

N° d'enregistrement
au C.N.R.S.
A O 4 224

THÈSE

DE DOCTORAT D'ÉTAT
ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

par

MICHEL VENUAT

pour obtenir

le grade de Docteur ès Sciences



SUJET : LES DÉFORMATIONS SOUS CHARGE DU BÉTON DURCI

Thèse soutenue le 22 Avril 1970 devant la Commission d'examen

MM. SIESTRUNCK *Président*

VICHNIEVSKY	}	<i>Examineurs</i>
L'HERMITE		
PELTIER		

THÈSE

DE DOCTORAT D'ÉTAT
ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

présentée

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

par

MICHEL VENUAT

pour obtenir

le grade de Docteur ès Sciences



SUJET : LES DÉFORMATIONS SOUS CHARGE DU BÉTON DURCI

Thèse soutenue le 22 Avril 1970 devant la Commission d'examen

MM. SIESTRUNCK *Président*

VICHNIEVSKY
L'HERMITE
PELTIER

} *Examineurs*



Les déformations sous charge du béton durci

par M. VENUAT,
Chef du Service Technologie au C.E.R.I.L.H.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici M. le Professeur SIESTRUNCK qui a bien voulu me permettre d'effectuer cette recherche sous sa haute direction. Qu'il me soit permis d'y associer M. le Professeur R. VICHNIEVSKY ainsi que M. R. L'HERMITE et M. R. PELTIER qui ont accepté de faire partie de ce Jury d'examen.

J'exprime ma profonde gratitude à M. R. PELTIER, Directeur Général du C.E.R.I.L.H. ainsi qu'à M. A. JOISEL, Directeur du Laboratoire pour les conseils qu'ils m'ont donnés et pour m'avoir autorisé à effectuer ces recherches et à en présenter les résultats.

Je remercie enfin mes collaborateurs, M. TRAN, Ingénieur, MM. PECQUENARD et VETOIS, Techniciens de mon Service, pour la part qu'ils ont prise à ce travail ainsi que la Direction de la Revue des Matériaux qui a bien voulu se charger de l'édition de cette thèse.

SOMMAIRE

Chapitre 1

DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1.1. Introduction.
- 1.2. Principaux paramètres influençant le fluage.
 - 1.21. Composition du béton et dimension des pièces.
 - 1.22. Milieu de conservation et âge de chargement.
 - 1.23. Sollicitations.
- 1.3. Théories du fluage, modèles et formules empiriques.
 - 1.31. Les théories du fluage.
 - 1.32. Les modèles rhéologiques.
 - 1.33. Les formules pour le calcul du fluage.

Chapitre 2

CHOIX DES METHODES ET APPAREILLAGES REALISES

- 2.1. Milieux d'expérimentation et choix des matériaux.
 - 2.11. Salle d'essais.
 - 2.12. Mise au point des matériaux.
 - 2.13. Définition de certains termes.
- 2.2. Appareil de compression mono-axiale.
 - 2.21. Description des appareils.
 - 2.22. Dispersion des résultats.
 - 2.23. Influence des repères de mesure.
 - 2.24. Moyens d'améliorer les mesures et de réduire les dispersions.
- 2.3. Appareil de flexion.
- 2.4. Appareil de traction.
- 2.5. Appareil de torsion.
- 2.6. Appareils d'empreinte.

Chapitre 3

RECHERCHES EFFECTUEES

- 3.1. Résultats obtenus en compression.
 - 3.11. Influence du ciment
 - nature
 - finesse
 - dosage.
 - 3.12. Influence des additions constituants secondaires chaux grasse.
 - 3.13. Influence de certains adjuvants accélérateurs entraîneurs d'air.
 - 3.14. Influence du milieu de conservation carbonatation température.
 - 3.15. Phénomène de recouvrance sur pâte pure.
- 3.2. Résultats obtenus en traction pure.
 - 3.21. Dispersion des essais.
 - 3.22. Influence du taux de chargement.
 - 3.23. Influence de la nature du ciment.
- 3.3. Résultats obtenus en flexion.
 - 3.31. A l'aide du premier type d'appareil.
 - 3.32. A l'aide du deuxième type d'appareil.
- 3.4. Résultats obtenus en torsion.
- 3.5. Résultats obtenus avec les appareils d'empreinte sous charge.

Chapitre 4

CONCLUSIONS

CHAPITRE 1

DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES

1.1. INTRODUCTION

Si les phénomènes de déformations sous charge du béton n'étaient pas complexes, il n'y aurait sans doute pas eu les quelques 1 000 articles écrits sur ce sujet depuis le début du siècle. Encore ne jettent-ils qu'une faible lumière sur ce que doit être la vérité et ils posent souvent plus de questions qu'ils n'en résolvent. Sans doute la vérité se trouve-t-elle dans une meilleure connaissance de la structure du matériau et dans celui de son vieillissement. On sait que le béton est un matériau en perpétuelle évolution :

- l'hydratation du ciment se continue longtemps, les résistances mécaniques augmentent ou se modifient et il en est de même des autres propriétés, et en particulier des modules d'élasticité ;

- la carbonatation progressive modifie son comportement ;

- les expansifs éventuels des ciments peuvent provoquer des contraintes internes ;

- le béton absorbe ou laisse partir de l'eau...

En particulier soumis à l'action d'une charge il se déforme instantanément. Si la charge subsiste il continue à se déformer très lentement dans le temps : c'est le phénomène du fluage qui existe pour toutes les natures de sollicitations (compression, traction, torsion ou la combinaison de ces effets). Le béton chargé « s'écoule » comme le ferait un liquide mais à une échelle de temps très différente : il possède une sorte de viscosité avec un gradient de vitesse extrêmement lent (sa viscosité serait de l'ordre de 10^{17} poises). La rhéologie, science de l'écoulement englobe donc ces phénomènes. ON PEUT PARLER DE LA RHÉOLOGIE DU BÉTON DURCI. Le fluage n'est pas une propriété réservée au seul béton : tous les matériaux s'écoulent plus ou moins vite sous charge : métaux, bois, plastique, caoutchouc, roches... La nature nous en donne de nombreux exemples depuis l'écoulement du fromage jusqu'au tassement des sols, aux plissements des massifs montagneux sous l'effet du temps, des pressions et des températures.



Le fluage du béton est connu depuis longtemps puisqu'il semble bien que ce soit WOOLSON en 1905 qui l'observa le premier (1) *, E. FREYSSINET s'y intéressa dès 1907 ; ses recherches et sa théorie sont bien connues en France depuis 1934 (2).

(*) Les chiffres entre parenthèses renvoient à la liste bibliographique donnée au chapitre 5.

Les premiers essais sérieux ont été faits vers 1925 par R. et H. DAVIS et par GLANVILLE. Il existe un certain nombre de bibliographies sur le sujet, en particulier celle de :

- l'American Concrete Institute (3) où sont mentionnés 500 articles environ : nous avons d'ailleurs à partir de ces données construit l'HISTOGRAMME du nombre des articles connus de 1905 à 1965 (figure 1-1) ;

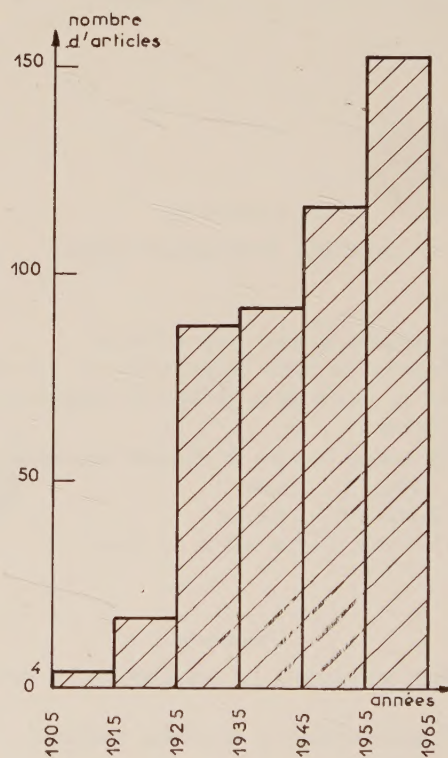


FIG. 1.1. Histogramme des articles sur le fluage de 1905 à 1965.

- d'ARUTUNJAN qui indique plus de 200 références dans un article bien documenté (4) ;

- de L'HERMITE qui a analysé plus de cent travaux de recherches et a fait le point dans un article fondamental, très détaillé paru en 1957 et intitulé « Que savons-nous de la déformation plastique et du fluage du béton » (5) ;

- la Cement and Concrete Association (6) qui donne plus de 800 articles traitant du fluage et du retrait du béton.

Il serait trop long — et sans grand intérêt — de mentionner les noms de tous les chercheurs dans ce domaine. Signalons cependant quelques-uns parmi beaucoup d'autres :

DUTRON, GLUCKLICH, HANSEN, L'HERMITE, MAMILLAN, NEVILLE, POWERS, ROSS, RUSCH, VASILEV, WASHA.

Des organismes regroupent les recherches faites sur le fluage et organisent périodiquement des colloques, comme la F.I.P., les ponts et charpentes, le C.E.B., la R.I.L.E.M. Cette dernière a organisé un colloque en 1958, l'autre en 1968 à Munich.

*
**

L'intérêt des études sur le fluage s'est accru au cours des deux dernières décennies, du fait de la construction d'éléments de plus en plus minces, travaillant à des taux de contrainte élevés et surtout du fait du développement du béton précontraint.

Le fluage intervient sur tous les éléments chargés de la construction et en particulier ceux en béton et en béton armé.

Il provoque :

— le raccourcissement des pièces comprimées (d'où des décollements d'enduit, des fissurations de cloisons et des éléments de remplissage...) ;

— l'augmentation des flèches des poutres, des arcs et des poutrelles dans le bâtiment (d'où des soulèvements de revêtements...) et dans les ouvrages d'art.

Le fluage a des inconvénients encore plus marqués dans le cas du béton précontraint du fait de la baisse de tension qu'il provoque dans les câbles et dont il faut tenir compte dans les calculs.

La connaissance de ces accourcissements permet de trouver la TENSION INITIALE à appliquer pour la mise en tension des câbles et la tension qui restera ensuite, ou TENSION DE SERVICE dans l'ouvrage.

Remarquons en passant que les autres baisses de tension peuvent être dues :

- à la relaxation des aciers,
- aux pertes par frottement,
- éventuellement à l'enfoncement du cône.

On voit donc tout l'intérêt présenté par l'étude de ce phénomène afin de pouvoir :

- agir sur certains paramètres en vue de diminuer le fluage ;
- prévoir, dans les conditions d'utilisation, et en fonction du temps, le fluage des éléments chargés.

FIG. 1-2

Schéma des phénomènes de fluage et de retrait.

Conservation dans l'air.

1.2. PRINCIPAUX PARAMETRES INFLUENÇANT LE FLUAGE

Avant de passer en revue l'influence des différents paramètres, donnons l'allure générale des déformations lors d'un chargement en compression (figure 1-2). On distingue, dans le cas d'une pièce en béton conservée dans l'air :

— UN RETRAIT LIBRE hydraulique, lent, en partie irréversible (lors d'une mise à l'eau de la pièce). Ce retrait a lieu par exemple sur la pièce avant chargement ; il se poursuit ensuite après chargement (un retrait de carbonatation s'y ajoute) ;

— une DÉFORMATION INSTANTANÉE, ÉLASTIQUE, RÉVERSIBLE, lors du chargement ;

— une DÉFORMATION PLASTIQUE LENTE sous charge, en partie réversible : c'est le fluage proprement dit.

La déformation totale observée est la combinaison de ces différentes déformations.

Au déchargement de la pièce, on observe :

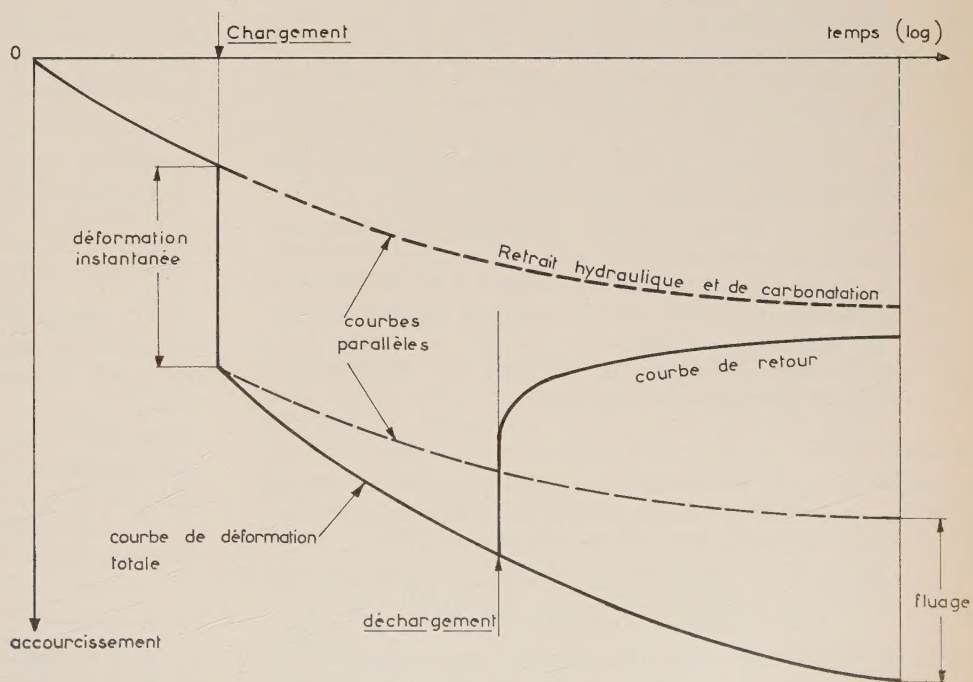
— une déformation de retour instantanée (en principe plus faible que la déformation instantanée au chargement) ;

— une déformation de retour très lente, « différée » ou recouvrance.

Il reste cependant une DÉFORMATION PERMANENTE (ou plastique). Dans le cas d'une pièce en béton conservée dans l'eau il n'y aurait pas de retrait libre mais au contraire un léger gonflement. Les autres phénomènes seraient analogues mais l'amplitude des déformations serait beaucoup plus faible.

1.21. Composition du béton et dimension des pièces

C'est la PÂTE PURE DE CIMENT qui est la cause principale du fluage. L'influence de la nature du ciment a été peu étudiée. NEVILLE (7) constate que le fluage varie du simple au double suivant le ciment et que c'est surtout le degré d'hydratation de cette pâte qui a de l'importance. MAMILLAN a trouvé qu'à 1 an et pour une contrainte en compression de 125 kgf/cm² (chargement à 28 jours), la déformation totale était sur la pâte pure de l'ordre de :



1 000 μ/m dans l'eau,
4 000 μ/m dans l'air à 50 % d'humidité relative.

La déformation est très approximativement le double de celle obtenue sur un béton dosé à 350 kg de ciment. On constate cependant que pour un béton donné le fluage diminue légèrement lorsque le dosage en ciment augmente. CELA LAISSERAIT DONC SUPPOSER L'EXISTENCE D'UN CERTAIN DOSAGE EN CIMENT — SANS DOUTE ASSEZ ÉLEVÉ — QUI DONNERAIT LE FLUAGE MINIMUM. Ce point est très important à considérer.

Plus le DOSAGE EN EAU est élevé et plus le fluage est grand — et corrélativement plus les résistances mécaniques sont faibles.

Les GRANULATS interviennent par leur nature, leur taille, leur répartition. Ils présentent 60 à 80 % du volume du béton et s'opposent au fluage de la pâte qui les entoure. Ils sont plus ou moins « compressibles » et plus ou moins poreux. Ils peuvent bouger et se déplacer légèrement sous l'effet des contraintes voire même absorber un peu de pâte s'ils sont poreux. On observe bien au début de l'application des charges une sorte de tassement du squelette, les grains prennent leur place (c'est une « consolidation » irréversible). Mais c'est surtout leur module de déformation qui conditionne le fluage. DAVIS a par exemple trouvé les déformations suivantes au bout de 25 ans pour des bétons conservés à 50 % d'humidité relative et confectionnés avec des granulats différents :

granulats de grès	: 2 600 μ/m
granulats de basalte	: 2 100 μ/m
granulats de granit	: 1 700 μ/m
granulats de quartz	: 1 300 μ/m

Le fluage peut donc varier du simple au double suivant la nature du granulat. Des résultats assez contradictoires ont été obtenus sur le fluage des bétons de granulats légers.

BEST (8) a opéré sur des bétons à base de granulats légers de schistes expansés. Ses essais de fluage à 18 mois montrent que le fluage est du même ordre de grandeur qu'avec des bétons à base de granulats lourds silico-calcaires, lorsque l'on opère sur des bétons ayant des RÉSISTANCES MÉCANIQUES ANALOGUES.

Peu de recherches ont été faites sur l'influence DES ADJUVANTS. HOPE et NEVILLE (9) trouvent que certains adjuvants augmentent le fluage pour des bétons de mêmes résistances mécaniques. Cela provient sans doute du fait que les adjuvants utilisés étaient tous des entraîneurs d'air. L'influence de l'air occlus reste donc à étudier. D'autres obtiennent très peu de différence avec ou sans adjuvant (à ouvrabilité égale). Il est certain que tout est lié aux résistances mécaniques du béton et à la progression de celles-ci dans le temps. Un adjuvant modifiera le fluage dans la mesure où il modifiera les résistances mécaniques et partant le module de déformation du béton.

Le SERRAGE, la COMPACITÉ jouent également un certain rôle qui n'a jamais été très bien étudié, de même que l'HÉTÉROGÉNÉITÉ. Le fluage est certainement différent dans le cas d'un béton hétérogène et suivant que la contrainte s'exerce parallèlement ou perpendiculairement aux couches de coulée (cela doit aussi fausser les valeurs du coefficient de POISSON qui mériteraient d'être étudiées et précisées).

REMARQUE

Aucun auteur — à notre connaissance — ne parle des expansions possibles dues au ciment ou à d'autres causes, expansions qui peuvent, au même titre que le retrait perturber le fluage.

La DIMENSION DES ÉPROUVETTES est toujours forcément limitée en laboratoire. Pourtant la vitesse du fluage (comme la vitesse du retrait) sont très influencées par le rapport $\frac{\text{surface}}{\text{volume}}$

des pièces. THIEL (10) a obtenu après 1 an un fluage supérieur de 15 % pour des prismes de $10 \times 10 \times 60$ cm comparé à des prismes de $20 \times 20 \times 60$ cm. L'HERMITE donne les chiffres suivants pour des éprouvettes en béton conservées à 50 % d'humidité relative et au bout de 500 jours :

1,5 mm/m pour des éprouvettes de $40 \times 40 \times 120$ cm
1,75 mm/m pour des éprouvettes de $20 \times 20 \times 60$ cm
1,95 mm/m pour des éprouvettes de $14 \times 14 \times 56$ cm
2,1 mm/m pour des éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm.

Tout cela semble donc être lié A LA VITESSE DE DÉPART ET DE TRANSFERT DE L'EAU. Il est possible que le fluage final soit le même quelle que soit la dimension des éprouvettes mais pour des pièces massives le temps nécessaire pour atteindre ce fluage dépasse certainement la vie même de ces pièces. Beaucoup ont observé que pour des conservations dans l'eau, la dimension des éprouvettes avait assez peu d'influence (on voit l'intérêt que présente la PROTECTION EN SURFACE du béton empêchant ou diminuant l'évaporation de l'eau).

1.22. Milieu de conservation et âge de chargement

1.221. Influence de l'hygrométrie.

Les essais de fluage (comme ceux de retrait) sont souvent effectués aux laboratoires dans une atmosphère contrôlée à 20° C et 50 % d'humidité relative. Le fluage dans ces conditions est de 3 à 5 fois supérieur à celui obtenu dans l'eau à 20° C. MAMILLAN (11) a montré que l'on pouvait admettre avec une bonne approximation (d'après ses travaux et ceux de DUTRON en particulier) que le FLUAGE SPÉCIFIQUE* final diminuait linéairement lorsque l'hygrométrie variait de 45 à 100 % (et pratiquement dans le rapport de 4 à 1).

LE CAMUS (12) A EU LE MÉRITE DE BIEN MONTRER L'IMPORTANCE D'UNE CONSERVATION DANS UNE ATMOSPHÈRE A HYGROMÉTRIE CONTRÔLÉE. On pourrait penser que les différences de déformations entre des éprouvettes chargées et des éprouvettes de même nature mais non chargées conservées dans une atmosphère sèche, proviennent D'UNE DIFFÉRENCE DE PERTE D'EAU. Or on ne constate pas ce phénomène. Cette question a souvent été évoquée. Il faudrait supposer :

— soit qu'il n'y ait pas de perte d'eau supplémentaire de l'intérieur des éprouvettes vers l'extérieur par évaporation, mais seulement des déplacements lents d'eau à l'intérieur de la structure du béton (par exemple d'un canal d'une dimension donnée à un canal plus petit) ;

— soit que les différences de perte d'eau entre éprouvettes chargées et éprouvettes non chargées soient tellement faibles que les mesures habituelles de poids ne sont pas assez précises pour pouvoir les détecter. Le calcul montre par ailleurs qu'il faudrait faire des mesures très précises, FREYSSINET parlait de mesures au millionième près.

Le phénomène peut aussi être en partie masqué par la CARBONATATION qui provoque un gain de poids : cela a été étudié en ce qui concerne l'influence sur le fluage par PIHLAJAARA (13).

En fait, dans la nature les ouvrages sont plus massifs que les éprouvettes de laboratoire et L'HYGROMÉTRIE MOYENNE est plus élevée (elle varie en France, et suivant les régions de 60 à 85 %). LES ALTERNANCES de séchage et d'humidification n'accroissent pas les déformations au fluage. MAMILLAN a même montré

(*) On appelle *fluage spécifique* le fluage par unité de charge et évalué par exemple en μ/m et par kgf/cm^2 .

que « le fluage moyen en conservation alternée est inférieur à la moyenne du fluage dans l'eau et dans l'air ».

Afin de diminuer le fluage SOLOMATOV (14) montre l'intérêt présenté par le traitement des surfaces en béton à l'aide d'un revêtement de résines. Ce revêtement empêche le retrait et diminue considérablement le fluage, il protège en plus le béton contre les attaques chimiques du milieu extérieur.

1.222. Influence de la température.

La température exerce une action non négligeable sur le fluage. Il faut donc en tenir compte pour certains ouvrages et en particulier pour ceux du génie atomique (caisson précontraint de réacteur nucléaire). Des essais effectués par ENGLAND et ROSS (15) de 20 à 140° C sur éprouvettes de béton protégées ou non de la dessiccation ont montré que le fluage augmentait en fonction de la température. Il était doublé de 20 à 80° C et multiplié par 3 ou 4 en passant de 20 à 140° C (éprouvettes sollicitées sous 70 kgf/cm² à des âges s'échelonnant de 1 à 60 jours). Une étude récente de KURASAWA (16) montre l'influence de la température sur le fluage de poutres en béton chargées à 120 kgf/cm² (pour une résistance à la rupture de 460 kgf/cm²). Cet auteur obtient après 1 an et par rapport à 20° C :

- un fluage doublé pour 70° C,
- un fluage triplé pour 90° C.

Nous avons eu également l'occasion de donner nos propres résultats à 5, 20 et 40° C pour le fluage en compression et en flexion (17). D'après L'HERMITE le fluage varierait de la façon suivante (sur béton durci 7 mois) :

- 20° C : 1 (référence)
- 100° C : 3
- 200° C : 7
- 400° C : 20.

CRUZ (18) a étudié le fluage du béton à haute température sur des bétons à 28 jours chargés à 45 % de leur charge de rupture et pour des temps de chauffage de 5 heures. Le fluage est multiplié par 32 en passant de 23° C à 650° C comme le montre le *tableau suivant* :

°C	23	145	315	480	650
Fluage relatif	1 (réf.)	3,3	6,4	14,9	32,6

(d'après CRUZ)

Ces résultats sont utiles à connaître pour le comportement du béton lors des incendies.

MARÉCHAL (19) a observé un phénomène tout à fait différent en opérant sur des éprouvettes en béton âgées de 1 an et portées progressivement à des températures allant jusqu'à 400° C pendant 15 jours. Elles ont ensuite été chargées à 50 ou 100 kgf/cm². Il observera alors une augmentation du fluage de 20 à 50° C puis une décroissance de 70 à 105° C, enfin une nouvelle augmentation de 105 à 400° C. Ces essais montrent une fois de plus que le problème du fluage est complexe et que de nombreux paramètres interfèrent.

1.223. Influence de l'âge de chargement.

L'âge de mise en charge a une certaine influence sur le fluage puisqu'en général plus l'âge de mise en charge est long et plus le béton est résistant et a un module d'élasticité élevé

(surtout s'il a été conservé dans l'eau). GUYON (20) donne le tableau suivant où le fluage de référence est pris à 28 jours.

Déformations	Mise à charge à				
	3 j.	7 j.	28 j.	90 j.	365 j.
Instantanée	1,5	1,2	1	0,93	0,91
Sous charge (à long terme)	2,39	1,68	1	0,68	0,44

DELARUE (21) donne les valeurs suivantes obtenues sur du béton précontraint :

Age du béton à la mise en précontrainte (en jours)	Réduction du fluage final en fonction de l'âge d'application de l'effort (%)
7	0
14	6 à 7
28	10 à 12
56	15 à 19

MAMILLAN a trouvé par exemple un fluage plus élevé de 40 % pour un béton chargé à 7 jours par rapport à celui chargé à 90 jours et pour une conservation après chargement dans l'air. Par contre il semble que pour une conservation après chargement dans l'eau l'âge de chargement a assez peu d'influence.

1.23. Sollicitations

1.231. Temps et taux de chargement.

Après une déformation rapide pendant les premières heures qui suivent le chargement, le fluage augmente lentement dans le temps suivant une loi D'ALLURE EXPONENTIELLE dont nous donnerons plus loin l'expression analytique probable. Le fluage se continuerait dans le temps sans que l'on sache s'il y a vraiment une LIMITE. Les essais les plus longs connus à ce jour sont ceux de R. DAVIS commencés en 1930. D'après cet auteur, le fluage augmenterait, par rapport au fluage obtenu à 1 an de :

- 20 % en 5 ans,
- 25 % en 10 ans,
- 35 % en 30 ans.

C'est dire que des ESSAIS A 1 AN PERMETTRAIENT DÉJÀ D'AVOIR UNE IDÉE SUFFISANTE DU FLUAGE DES BÉTONS AUX AGES PLUS AVANCÉS. En extrapolant on voit que le fluage à 100 ans serait de 50 % plus élevé que celui à 1 an. Cela est rassurant puisque la question de savoir s'il y a une limite finie au fluage ne présente pas d'intérêt pratique, la durée de vie des ouvrages étant limitée. On peut encore en tirer la conclusion que sauf pour quelques essais particuliers, les résultats obtenus après 1 an indiquent suffisamment bien l'allure des phénomènes et l'influence des paramètres étudiés. D'ailleurs au-delà de 1 an la progression du fluage pose des problèmes de précision de mesure et le coût des essais devient très élevé.

On a essayé de rassembler dans le tableau suivant les variations moyennes de fluage dans le temps pour un béton classique conservé à 20° C et à 50 % d'humidité relative (le fluage à 1 mois étant pris comme référence).

Temps	1 h	1 j	7 j	1 mois	3 mois	1 an	5 ans	30 ans	100 ans
Augmentation du fluage	0,5	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1

Certaines formules pratiques permettent le calcul de la valeur limite du fluage.

En ce qui concerne LA GRANDEUR DE LA CONTRAINTE APPLIQUÉE presque tous les auteurs sont d'accord pour admettre que dans une certaine limite il y a PROPORTIONNALITÉ ENTRE LA CHARGE APPLIQUÉE ET LE FLUAGE CORRESPONDANT (il en serait de même pour la déformation instantanée). La proportionnalité ne serait pas respectée pour de très faibles ou de très fortes charges. La limite supérieure se situerait suivant les auteurs entre 25 ET 50 % DE LA CHARGE DE RUPTURE. Au-delà le fluage progresserait proportionnellement beaucoup plus que la charge appliquée et des microfissures apparaîtraient dans le béton. La limite de la contrainte à partir de laquelle le fluage cesserait d'être proportionnel serait d'autant plus élevée que la résistance du béton serait plus forte. Il est certain que pour une contrainte atteignant 80 % de la charge de rupture instantanée le fluage s'effectue à une vitesse très grande et amène à plus ou moins longue échéance la rupture du béton. D'après NEVILLE le fluage serait même directement proportionnel au rapport :

$$\frac{\text{contrainte appliquée}}{\text{résistance à la rupture instantanée}}$$

1.232. Charges alternées et superposition des charges.

LE CAMUS a effectué des essais de fluage sous charge répétés et il a observé une accélération de la déformation plastique du béton. Cette accélération dépendrait de la fréquence des sollicitations et de la charge appliquée. Le fluage risque d'être augmenté si l'action constante d'une charge se superpose des contraintes cycliques à haute fréquence. Par contre, un béton âgé ayant subi pendant un certain temps l'action de charge permanente est beaucoup moins sensible à l'action des charges répétées qu'un béton n'ayant jamais été sollicité. Selon L'HERMITE (Que savons-nous de la déformation plastique et du fluage du béton) : « le fluage sous charge permanente et la déformation plastique sous charge répétée, ne s'ajoutent pas. Un béton « adapté » sous charge permanente n'est plus apte à se déformer sous charge répétée. La répétition des charges est probablement un procédé intéressant pour accélérer la déformation plastique ».

Il est d'autre part probable, suivant plusieurs auteurs, que le fluage en compression répond — en premières approximation — AU PRINCIPE GÉNÉRAL DE SUPERPOSITION DES EFFETS DES CHARGES (lorsque celles-ci restent inférieures au tiers de la charge de rupture instantanée). Cela est rassurant et permet le calcul du fluage lorsque le béton est soumis à des chargements partiels, par exemple après 3, 7 et 28 jours comme c'est souvent le cas POUR LE BÉTON PRÉCONTRAINT. Autrement dit, le fluage total serait égal à la somme des fluages partiels dus à l'application des diverses charges et en tenant compte évidemment de l'âge du béton et du temps d'application des différentes charges.

1.233. Allure des courbes de déchargement (recouvrance).

En déchargeant une éprouvette on a une brusque déformation élastique de retour presque instantanée puis une déformation lente visco-élastique différée qui peut durer plusieurs semaines. Il subsiste toujours une déformation plastique finale irréversible ou déformation résiduelle d'autant plus importante que la contrainte aura été plus élevée (la relation est pratiquement linéaire). On n'a pas pu prouver que les éprouvettes reprenaient de l'eau au milieu extérieur, on peut supposer que des mouvements d'eau ont lieu à l'intérieur même du béton. Lorsque l'on remet les éprouvettes dans l'eau, on observe que leur gonflement est d'autant plus grand que les éprouvettes ont été plus fortement chargées. Assez peu de recherches ont été faites sur LA RELAXATION DES CHARGES en imposant aux éprouvettes des déformations constantes.

1.234. Nature des diverses sollicitations.

Le plus grand nombre d'essais sur le fluage ont été effectués en COMPRESSION UNIAXIALE. Beaucoup d'auteurs ont cependant rapportés des essais de FLEXION qui sont assez simples à réaliser et correspondent aux types de sollicitations souvent rencontrés dans la pratique (poutrelles et poutres chargées dans les bâtiments et les ouvrages d'art). Remarquons cependant que l'état des contraintes n'est pas homogène dans les sections de béton puisqu'il existe des parties en compression et d'autres en tension avec possibilité dans ces dernières de fissures locales.

Les ingénieurs suivent l'évolution des flèches — ou plutôt des contre-flèches de certaines poutres de pont et même les déformations relatives aux diverses fibres intéressantes. Les lois générales trouvées en compression s'appliquent globalement au fluage en flexion. Par contre, beaucoup moins d'essais ont été faits en TRACTION PURE car ils sont plus difficiles à réaliser et l'on est vite limité par la contrainte maximale à appliquer, la résistance en traction étant de 10 à 15 fois plus faible que celle en compression. On arrive maintenant plus facilement à effectuer ces essais grâce à l'utilisation de colles pour fixer les embouts sur les éprouvettes à solliciter en traction.

LE CAMUS a étudié ce genre de sollicitation. Il a trouvé des courbes de fluage ayant la même allure que celles obtenues en compression.

GLANVILLE a trouvé que les fluages en compression et en traction avaient des valeurs approximativement égales (en tenant compte du retrait hydraulique). DAVIS a observé que la vitesse du fluage était plus grande en traction qu'en compression. MITZEL (22) a trouvé des résultats un peu différents et des fluages plus forts en traction qu'il attribue au fait qu'il n'y aurait pas superposition en traction des effets du retrait et du fluage. Quelques essais ont été faits en torsion par DAVIS, LAMBOTTE, LE CAMUS (23) (24). Ce type d'essai a l'avantage d'être indépendant du retrait hydraulique. En général, le fluage est proportionnel à la charge appliquée et certains ont cru remarquer que la vitesse de fluage était plus grande en torsion qu'en compression. Le fluage sous des contraintes bi- ou tri-axiales a été étudié surtout pour les roches mais assez peu pour le béton du fait du prix élevé et de la complexité de l'appareillage nécessaire. ROSS (25) a examiné le comportement du béton sous des contraintes bi-axiales. Il trouve une linéarité des déformations en fonction de la charge. DAVIS et ses collaborateurs ont trouvé qu'une pression latérale constante diminuait beaucoup le fluage axial (le chargement étant lui-même axial).

EN CONCLUSION, LES PARAMÈTRES ESSENTIELS SÉRAIENT :

- L'INTENSITÉ DE LA CHARGE ET LE TEMPS D'APPLICATION,
- LE MILIEU DE CONSERVATION (hygrométrie, température),
- LA RÉSISTANCE DU MATÉRIAU ET L'ÂGE DE CELUI-CI AU MOMENT DU CHARGEMENT.

1.3. THEORIES DU FLUAGE MODELES ET FORMULES EMPIRIQUES

1.31. Les théories du fluage

Différentes théories explicatives ont été proposées. Celles-ci sont difficiles à établir car le matériau étudié est DISCONTINU, ANISOTROPE, ÉVOLUTIF. Selon plusieurs auteurs le fluage s'expliquerait surtout grâce aux lois connues de la physique. La première théorie importante a été celle de FREYSSINET, qui a le mérite de la simplicité si elle n'est pas tout à fait exacte (2). FREYSSINET a compris très vite le rôle important joué par l'eau évaporable sur les phénomènes de retrait et de fluage, (pour lui le retrait et le fluage seraient deux aspects d'un même phénomène, le fluage serait un retrait amplifié par le chargement). Sa théorie s'appuie sur la loi de LAPLACE relative à la capillarité et les travaux de KELVIN sur les tensions de vapeur. Le béton est un milieu poreux contenant de l'eau et de l'air. Les ménisques qui relient les particules solides du béton constituent les frontières entre l'eau et l'air et ils exercent des contraintes d'autant plus importantes que leur rayon de courbure est plus petit. Il y a en effet le long des surfaces de séparation liquide-gaz, évaporation, condensation, équilibre.

Les théories sur la capillarité permettent de calculer en fonction de l'état hygrométrique de l'air, la dimension des ménisques séparatifs, et les valeurs des tensions que le liquide exerce sur les parois solides qu'il mouille.

On sait que la pression négative du liquide est donnée par la loi de LAPLACE :

$$\Pi = - \frac{2 \sigma}{r} \text{ avec}$$

Π : pression négative en dynes/cm²

σ : tension superficielle en dynes/cm (75 dynes/cm pour l'eau)

r : rayon des capillaires (cm) ou $2r$ = distance entre les parois des interstices.

Le tableau suivant donne les valeurs des pressions pour différentes valeurs de r et dans le cas de l'eau :

r	10 Å	25 Å	50 Å	500 Å	0,5 μ	5 μ
$-\pi$ (kgf/cm ²)	1500	600	300	30	3	0,3

Lorsque l'eau s'évapore les rayons de courbure diminuent et les contraintes augmentent resserrant les grains entre eux. Inversement, les rayons de courbure augmentent avec une reprise d'eau et les contraintes se relâchent. Le fluage et le retrait seraient des phénomènes physiques issus des tensions produites par les forces capillaires.

REMARQUE

On a critiqué la théorie de FREYSSINET en disant que d'après cette théorie il n'y aurait pas, en cisaillement, de mouvement d'eau et donc pas de fluage (pas de changement de volume). Or on sait que bien qu'il y a un fluage en cisaillement : la théorie de FREYSSINET est donc fausse. Sans doute on connaît dans la nature des corps sans eau qui présentent un fluage, les roches en particulier. Le mouvement de l'eau n'est donc sans doute pas la seule cause du fluage.

POWERS (26) explique le retrait et le fluage en partant de considérations thermodynamiques sur l'adsorption, et la désorption de l'eau dans le béton. Il analyse la répartition des forces internes qui changent avec les charges appliquées, les teneurs en eau et les différentes sortes d'eau et la température.

« Il est nécessaire de connaître la composition volumétrique et en particulier de mettre en cause l'existence d'espaces très étroits capables de contenir l'eau adsorbée ainsi que l'échange d'énergie qui accompagne l'adsorption et la désorption ». L'eau intercrystalline n'entrerait pas en compte dans le fluage : elle fait partie de la structure de la pâte hydratée et résiste aux efforts appliqués qu'elle supporte. Certaines molécules d'eau constituant des films d'eau plus ou moins épais subissent du fait des pressions des transferts depuis les régions comprimées où elles se trouvent vers des régions moins comprimées. Ce mouvement de molécules d'eau se continue jusqu'à un état d'équilibre thermodynamique final avec l'humidité ambiante. Une modification de l'état hygrométrique ou des taux de chargement remettent en cause l'équilibre thermodynamique. L'épaisseur des films d'eau diminue, d'où un accourcissement du matériau dans le sens des charges appliquées. Le retrait sans charge extérieure est dû au départ par évaporation d'une quantité d'eau appréciable dans les couches préalablement remplies d'eau.

De nombreuses autres théories et explications ont été proposées. RUETZ (27) par exemple pense que le mécanisme de fluage se trouve dans le glissement relatif des particules du colloïde submicroscopique. VOGT assimile le fluage du béton à celui d'un métal. ALI et KESLER présentent une théorie basée sur le pompage de l'eau du gel de la pâte de ciment associé à un fluage visqueux de la pâte. NEVILLE (28) pense que le fluage provient d'un écoulement visqueux de la pâte sous l'effet des efforts appliqués ainsi que des sollicitations qui en résultent sur les granulats qui sont plus ou moins déformables. DANTU (29) à ce sujet a obtenu pour un béton chargé sous 170 kgf/cm² en compression des contraintes pouvant être localement beaucoup plus élevées et pouvant atteindre 470 kgf/cm² dans certaines zones des granulats (mesures au moyen de jauges et de vernis photo-élastiques). Ses résultats sont reportés sur la figure 1-3. Beaucoup recherchent une explication en considérant différentes catégories d'eau, plus ou moins liée à la structure du matériau, plus ou moins mobile et plus ou moins visqueuse :

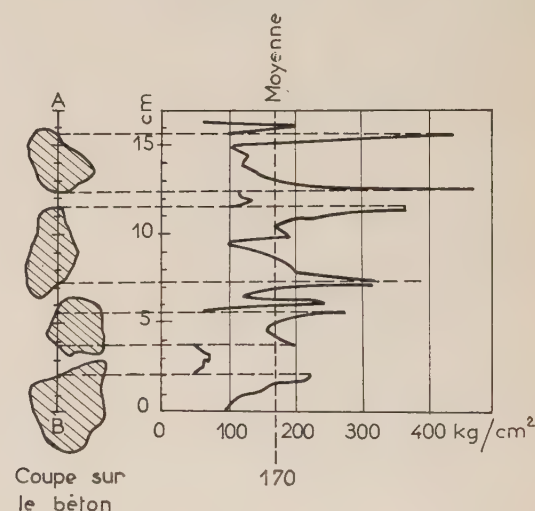


FIG. 1-3

Graphique des contraintes dans un béton supportant une charge de 170 kgf/cm² en compression.

(D'après DANTU, Annales I.T.B.T.P., Janvier 1958)

— eau des cavités des canaux et des gros vides qui part facilement la première ;

— eau contenue dans les capillaires de toutes dimensions et compris dans la pâte ou à la jonction de la pâte et des granulats ;

— eau du gel de la pâte hydratée,

— eau située entre les micro-cristaux ou adsorbée physiquement à leurs surfaces et dont l'épaisseur est de quelques molécules ;

— eau de constitution, comprise entre les feuillets de la tobermorite et faisant partie de la structure (elle reste en place).

Les vitesses de circulation de l'eau dans les interstices et capillaires étroits et sous l'effet des contraintes sont très lentes. On peut en avoir une idée approximative en appliquant la loi de POISEUILLE (dont la validité est certainement douteuse dans le cas d'interstices très petits) :

$$\text{Vitesse moyenne } V = \frac{\text{débit } Q}{\text{section } S} = \frac{\Delta P}{l} \frac{r^2}{8 \eta} \quad \text{avec}$$

ΔP : différence de pression

l : longueur parcourue

r : rayon du capillaire

η : viscosité (ici de l'eau à 20° C, elle serait de 0,01005 poise, par contre à 0 °C elle serait de 0,01785 poise).

Le tableau suivant donne en fonction de r et de ΔP les vitesses de circulation de l'eau exprimées en mm/h.

r (Å)	10	25	50	500
ΔP kgf/cm ²	1500	600	300	30
Vitesse mm/h	67×10^{-3}	170×10^{-3}	350×10^{-3}	4

Les vitesses sont extrêmement faibles surtout dans le cas de capillaires de petite section, ce qui expliquerait en partie la lenteur du fluage dans le temps. On peut d'ailleurs se demander jusqu'à quelles dimensions la formule de POISEUILLE s'applique car on sait que sous faible épaisseur l'eau est quasi solide. De plus la « viscosité » de l'eau dans les minuscules interstices submicroscopiques est sans doute très grande.

Plus récemment, de nombreuses discussions eurent lieu au dernier Symposium de Munich (1968) sur l'influence de l'eau adsorbée et de la couche intermédiaire d'eau sur le fluage et le retrait. Il en résultait surtout que l'accord était loin d'être unanime sur les interprétations avancées par les différents auteurs. Ces discussions portaient sur la structure de la pâte durcie de ciment, sur la forme de l'eau, ses possibilités de mouvement et sa viscosité sous fortes pressions et pour des couches très minces.

EN CONCLUSION LE FLUAGE NE PEUT ÊTRE EXPLIQUÉ SIMPLEMENT DU FAIT DES CAUSES MULTIPLES QUI ENTRENT EN JEU. Dans un béton soumis à un premier chargement il y a d'abord une sorte de consolidation du squelette, certains granulats pouvant bouger légèrement pour occuper une place plus stable. Cette cohésion atteinte, les granulats ne bougent plus. La pâte de ciment a un comportement visco-élastique : elle s'écoule avec une certaine viscosité, remplit au début les vides accessibles de la structure et éventuellement ceux des granulats poreux. La pâte transmet les pressions aux granulats qui se déforment plus ou moins en fonction de leurs modules et des contraintes appliquées. Sans doute le fluage est dû pour une part au départ de l'eau évaporable et aux contraintes capillaires qui en résultent ainsi qu'au déplacement lent de l'eau dans les interstices étroits de la pâte hydratée. Le fluage des cristaux eux-mêmes, indépendamment des questions d'eau n'est pas exclu (des glissements favorisés par des défauts de structure peuvent avoir lieu, les atomes toujours mobiles peuvent se rapprocher...). Pour de fortes charges des fissures microscopiques et des glissements locaux de caractère irréversible peuvent apparaître — HANSEN (30) a récemment montré que les premières fissures du béton apparaissent pour un taux de chargement atteignant 45 à 55 % de la charge de rupture en compression. Elles se localisaient à la limite des granulats et de la pâte et pouvaient avoir une largeur de 10 à 20 microns.

L'étude du fluage du béton se complique du fait de la progression de l'hydratation du liant et de sa carbonatation dans le temps.

1.32. Les modules rhéologiques

Certains auteurs ont cherché à représenter le comportement rhéologique du béton durci sous charge par des analogies électriques, d'autres auteurs par l'assemblage d'éléments mécaniques. Nous préférons cette dernière méthode. Elle permet une certaine approche du problème et une généralisation des phénomènes observés ainsi qu'une simplification d'écriture. PERSOZ (31) dans son ouvrage intitulé « Introduction à l'étude de la rhéologie » expose les principes permettant d'utiliser les modèles analogiques. Les modèles souvent utilisés pour le fluage du béton sont constitués par l'assemblage en série ou en parallèle de ressorts et d'amortisseurs (comme on suppose généralement un fluage linéaire on n'emploie ni les patins, ni les butées, ni les régulateurs...).

Examinons les 2 éléments analogiques qui seront utilisés (figure 1-4) :

— RESSORT A BOUDIN (schématisation de la loi de HOOKE)

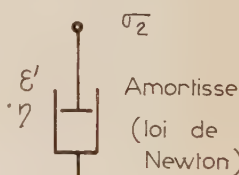
L'allongement ϵ est proportionnel à la contrainte appliquée σ_1 , le coefficient de proportionnalité E s'appelle module d'élasticité

$$\sigma_1 = E \epsilon$$

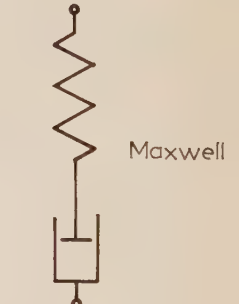
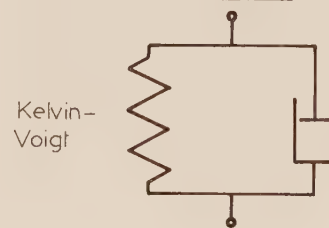
— AMORTISSEUR (schématisation de la loi de NEWTON)

L'amortisseur est constitué d'un piston perforé, mobile sans

Eléments analogiques utilisés



Modèles classiques



Modèles proposés pour le fluage du béton

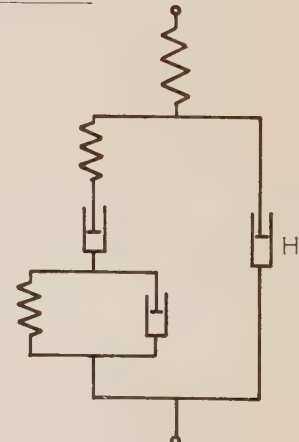
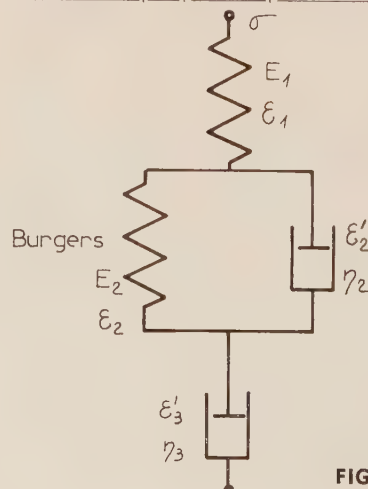


FIG. 1-4

frottement solide dans un cylindre rempli d'huile à comportement Newtonien.

La vitesse de déformation $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$ est proportionnelle à la contrainte appliquée σ_2 , le coefficient de proportionnalité η représente une viscosité

$$\sigma_2 = \eta \dot{\epsilon}$$

En assemblant ces 2 éléments de différentes façons, on obtient les modèles classiques suivants :

— MODÈLE DE KELVIN-VOIGT (ou corps réactif)

Il est constitué d'un ressort et d'un amortisseur en parallèle. La contrainte appliquée σ se divise en σ_1 (pris par le ressort) et σ_2 (pris par l'amortisseur). On a alors la relation :

$$\sigma = E\epsilon + \eta \dot{\epsilon}$$

L'intégration de cette équation par rapport au temps et dans l'intervalle $t = 0$, $t = \infty$ est assez compliquée. NOWACKI (32) donne une solution qui utilise les transformées de LAPLACE. On aboutit alors à la fonction de fluage suivante :

$$f(\sigma, t) = \frac{\epsilon}{\sigma} = \frac{1}{E} (1 - e^{-\lambda t})$$

$$\lambda = \frac{E}{\eta}$$

— MODÈLE DE MAXWELL (corps élastico-visqueux)

Il est constitué d'un ressort et d'un amortisseur en série. Les déformations dues à la contrainte appliquée s'additionnent. On obtient l'équation différentielle suivante (en éliminant les déformations du ressort et de l'amortisseur).

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\sigma'}{\eta}$$

d'où la fonction de fluage (t étant évidemment toujours positif)

$$f(\sigma, t) = \frac{1}{E} + \frac{t}{\eta}$$

REINER (33) représente le comportement du béton à l'aide d'un modèle de MAXWELL car il considère le béton comme une suspension de particules élastiques (granulats) dans un liquide très visqueux (la pâte de ciment).

— MODÈLE DE BURGERS

Les modèles à 2 paramètres ne sont pas suffisants pour représenter le comportement des matériaux. Nous préférons l'utilisation du modèle suivant, dit de BURGERS, souvent employé et qui avec ses 4 paramètres correspond plus à la réalité sans être trop compliqué. Il suppose, comme hypothèse simplificatrice de travail que le comportement du béton est du type visco-élastique linéaire. Cette hypothèse se vérifie bien dans la pratique surtout lorsque les charges appliquées restent inférieures à 50 % de la charge de rupture (cas général).

Ce modèle regroupe celui de KELVIN-VOIGT et celui de MAXWELL, ces 2 modèles étant disposés en série — (ou encore deux modèles de MAXWELL branchés en parallèle).

Dans ce schéma à 4 paramètres, on retrouve bien les éléments principaux du fluage du béton :

- élasticité instantanée au moment de l'application de la charge (ressort) ;
- déformation retardée asymptotique (ressort et amortisseur en parallèle) ;
- écoulement visqueux (amortisseur) et irréversible.

La contrainte appliquée étant σ , on a les équations suivantes :
déformation totale $\epsilon = \epsilon_1$ (ressort) + ϵ_2 (ressort-amortisseur) + ϵ_3 (amortisseur)

$$\sigma = E_1 \epsilon_1 = E_2 \epsilon_2 + \eta_2 \dot{\epsilon}_2 = \eta_3 \dot{\epsilon}_3$$

La fonction fluage (qui s'obtient en additionnant les fonctions fluage des 2 modèles constitutifs) s'écrirait :

$$f(\sigma, t) = \frac{1}{E_1} + \frac{t}{\eta_3} + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\lambda_2 t})$$

avec $\lambda_2 = \frac{E_2}{\eta_2}$

On constate que la courbe de fluage — ou de déformation

$\epsilon(t) = f(\sigma, t)$. σ prend la valeur $\frac{\sigma}{E_1}$ au moment de l'application de la contrainte σ puis présente une allure exponentielle. Lorsque l'on supprime la contrainte au temps t_1 , on a une recouvrance partielle instantanée (provenant du premier ressort) égale à $\frac{\sigma}{E_1}$. On a ensuite une recouvrance

partielle retardée due au corps de KELVIN-VOIGT. La déformation continue à diminuer dans le temps jusqu'à une valeur limite $\frac{t_1}{\eta_3}$

REMARQUES

Ce modèle a également été utilisé par MORLIER pour l'étude du fluage du charbon et par KEPES pour la rhéologie de certains hauts polymères.

Certains auteurs ont amélioré les modèles mais arrivent à des équations très compliquées. HANSEN (34) propose celui mentionné sur la figure 1-4 (déjà mentionnée) ; YOKOMICHI et KAKUTA (35) utilisent des ressorts et des amortisseurs, des corps de VOIGT ainsi que des patins à frottement sec.

Ces représentations peuvent être utiles mais il ne faut pas exagérer leur emploi.

1.33. Les formules pour le calcul du fluage.

Presque tous les chercheurs qui ont effectué des essais de fluage ont proposé LEURS FORMULES EMPIRIQUES, plus ou moins compliquées et qui correspondaient évidemment remarquablement bien avec leurs propres résultats, mais malheureusement souvent assez mal avec ceux des autres. Ces formules ont un but pratique certain et peuvent dans la majorité des cas donner des ordres de grandeur acceptables. C'est dire que ce sont les formules les plus simples et qui tiennent compte des principaux paramètres qui sont le plus facilement exploitables. Les paramètres suivants sont à prendre en compte :

- temps d'application de la charge et âge du béton au moment de la mise en charge ;
 - grandeur de la contrainte ;
 - résistance du matériau au moment de la mise en charge ou module de déformation ;
 - hygrométrie moyenne de conservation.
- Eventuellement :
- dimension des pièces ;
 - température.

Donnons des exemples des formules les plus connues :

Formule de AROUTIOUNIAN

$$F = (C_0 + \frac{A}{a}) (1 - e^{-\gamma(t-a)})$$

F : fluage à l'instant t.

a : âge du béton au moment de la mise en compression.

C₀, A, α : constantes.

Formule de L'HERMITE

$$\Delta_t = \Delta_i + (\Delta_m - \Delta_i) \left[1 - e^{-\left(k_1 \log \frac{a+t}{a} + k_2 t\right)} \right]$$

Δ_i : déformation rapide (pour 1 heure environ).

t : temps de chargement.

a : âge au moment du chargement.

k₁ et k₂ : coefficients à déterminer par des essais et qui tiennent compte de la qualité du béton et du milieu.

Δ_m : déformation totale finale (retrait compris).

Cette déformation finale peut se calculer

$$\Delta_m = \Delta_{mi} \left(1 + Q \frac{\Delta_r}{\Delta_{ro}} \right)$$

Δ_{mi} : fluage en absence de retrait.

Q : constante dépendant du béton.

Δ_r : retrait sous l'hygrométrie donnée.

Δ_{ro} : retrait théorique pour une humidité relative nulle.

Formule de HUMMEL

$$\varepsilon = 94 \cdot 10^{-6} \frac{P}{R \sqrt[3]{\left(\frac{R}{R_0}\right)^2}} \cdot \sigma$$

ε : fluage en ‰ (final).

σ : contrainte appliquée.

P : pores de la pâte de ciment (%).

R : résistance à la compression à la fin de la charge.

R₀ : résistance à la compression à l'application de la charge.

Formule de NEVILLE

$$\log \frac{C_p}{C} = \alpha \log \left(\frac{1}{(1-g-u)} \right)$$

C_p : fluage pâte pure.

C : fluage béton.

g : volume des granulats par unité de volume du béton.

u : volume de ciment non hydraté par unité de volume du béton.

$$\alpha = \frac{3(1-\mu)}{1+\mu+2(1-2\mu_a) \frac{E}{E_a}}$$

μ : coefficient de POISSON du béton.

μ_a : coefficient de POISSON des granulats.

E : module du béton.

E_a : module des granulats.

Cette formule serait également applicable au fluage du béton léger.

Formule de VOELLMY

$$\varepsilon = \frac{7}{30} \frac{\sigma}{R_0} \left[(130 - F) \frac{E}{C} \left(E + \frac{C}{\varrho} \right) \right] \left[\frac{1}{1 + \frac{\mu}{3}} \right]$$

Mêmes significations que précédemment, et avec :

F : humidité relative (%).

E et C : poids d'eau et de ciment par m³ de béton.

ρ : masse volumique du ciment.

μ : pourcentage d'armature.

On remarquera qu'elle tient compte des armatures du béton.

DUTRON fait intervenir dans sa formule les modules d'élasticité, l'humidité relative et le retrait hydraulique.

LYSE prend en compte le pourcentage de pâte de ciment dans le béton.

TORROJA tient compte de la résistance en compression au moment de l'application de la charge et de l'humidité relative. D'autres auteurs se sont limités à donner le fluage uniquement en fonction du temps :

GIANGRECO (36) a recours à la méthode des moindres carrés pour tracer sa courbe ayant la forme suivante :

$$\varepsilon(t) = A (1 - e^{-\alpha t})$$

A, α et 1 étant des coefficients dépendant de l'âge de conservation du béton, de la charge...

LORMANN donne la formule

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{\infty} \left(\frac{t}{a+t} \right)$$

où ε(t) est le fluage au temps t et ε_∞ le fluage à l'infini,

a : temps d'application de la charge.

Cette formule est utile en pratique car elle permet de prévoir le fluage final à partir de certains points expérimentaux. MAMILLAN l'a utilisée avec succès.

SLANK propose une formule encore plus simple :

$$\varepsilon(t) = \sqrt[n]{t}$$

DELARUE considère le fluage comme la somme de 3 sortes de déformations en fonction du temps :

— au début le fluage serait proportionnel à t (cette phase serait d'autant plus longue que le béton serait plus jeune) ;

— le fluage serait ensuite fonction de log $\frac{t}{a}$ (a étant l'âge d'application de la charge) ;

— enfin le fluage suivrait une fonction du type exponentiel décroissant.

Récemment, HANNANT (37) donne une formule simple permettant de calculer le fluage suivant une direction donnée dans le cas d'une contrainte tri-axiale de compression :

$$C_{mx} = C_x \left[1 - \nu \frac{\sigma_y + \sigma_z}{\sigma_x} \right]$$

avec :

C_{mx} : fluage dans la direction de l'axe des contraintes σ_x pour un chargement tri-axial.

C_x : fluage dans la direction des contraintes pour un chargement mono-axial suivant l'axe des x.

σ_x σ_y σ_z : contraintes suivant les axes principaux x, y et z.

ν : coefficient de POISSON au fluage.

D'autres proposent l'utilisation de graphiques. C'est sur ce principe qu'est basée la réglementation française pour le calcul du FLUAGE DU BÉTON PRÉCONTRAIT.

Cette réglementation donne une formule qui suppose le fluage linéaire en fonction de la contrainte. Elle est valable pour un béton de ciment portland moyen et pour une température de 20° C.

Selon ces hypothèses la déformation de fluage à un instant quelconque t_n sous l'influence d'une contrainte appliquée à l'instant t_1 et subissant à des instants tels que t_i des variations brusques d'intensité peut être prise égale à :

$$\varepsilon_{et_1} \varphi_N \zeta t_1 \varrho (t_n - t_1) + \Sigma \Delta \varepsilon_{et_i} \varphi_N \zeta t_i \varrho (t_n - t_i)$$

où :

ε_{et_1} représente la déformation élastique instantanée du béton sous l'effet de la contrainte à l'instant t_1 (que l'on pourra calculer en donnant à E_b la valeur $21\,000 \sqrt{\sigma'_{jk}}$, par exemple si $\sigma'_{jk} = 400 \text{ kgf/cm}^2$, alors $\varepsilon_{et_1} = 420\,000 \text{ kgf/cm}^2$).

$\Delta \varepsilon_{et_i}$ la déformation élastique instantanée (calculée suivant la même règle) provoquée par les changements brusques d'intensité de la contrainte.

φ_N le coefficient final de fluage, lui-même égal au produit de trois coefficients :

$$\varphi = \varphi_0 \alpha_f \beta_f$$

φ_0 dépendant des conditions climatiques,

α_f dépendant des dimensions de la pièce,

β_f dépendant de la composition du béton.

ζ un coefficient tenant compte de l'âge (t_1 , t_i) lors de l'application ou d'une variation de la contrainte.

ϱ un coefficient tenant compte de l'influence du temps.

$(t_n - t_1)$ l'intervalle de temps entre l'application de la contrainte (t_1) et le temps considéré (t_n).

$(t_n - t_i)$ l'intervalle de temps entre une variation d'intensité de la contrainte (t_i) et le temps considéré (t_n).

Les valeurs moyennes des coefficients φ_0 , α_f , β_f en fonction des paramètres qui les définissent peuvent être lues sur les diagrammes (figure 1-5).

Ces règlements précisent également comment le calcul simplifié peut être effectué :

a) A défaut d'un calcul plus précis du fluage, on pourra admettre que la déformation de fluage, sous une charge ou surcharge permanente appliquée à j jours est le double de la déformation instantanée calculée par application du module E_b , (la déformation totale est ainsi supposée égale au triple de la déformation instantanée). Cette hypothèse simplificatrice définit ainsi un module de déformation de fluage

$$E_f = \frac{E_b}{2}$$

permettant de calculer un ordre de grandeur du raccourcissement relatif de fluage ε_f considéré comme une déformation élastique différée en fonction de la contrainte σ'_b du béton au niveau de l'armature intéressée et de la résistance de celui-ci, soit :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma'_b}{E_f}$$

b) Une grande densité d'armatures ordinaires diminue la compression par suite des entraves opposées au retrait et à la précontrainte. Cette réduction peut être calculée, la déformation instantanée s'en déduit et il est possible ainsi de tenir compte du pourcentage d'armatures sur le fluage.

Les règlements indiquent les modifications à apporter pour des températures inférieures à 20° C :

En présence de températures inférieures à 20° C, on attribuera au béton un âge de mise en charge corrigé, donné par la formule suivante valable de -10° C à +20° C.

$$t_r = \frac{\Sigma \Delta t (T + 10^\circ)}{30^\circ}$$

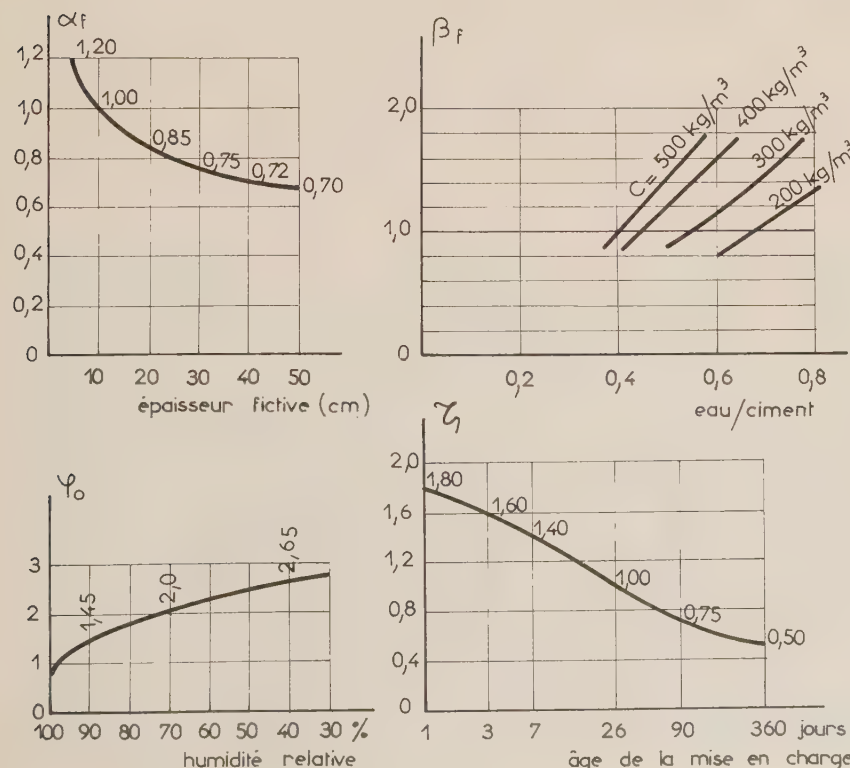
dans laquelle :

t_r représente l'âge corrigé de mise en charge exprimé en jours

Δt représente le nombre de jours pendant lesquels le durcissement s'est fait à la température T exprimée en degrés centigrades.

REMARQUE

Les règlements donnent aussi des formules analogues pour le calcul du retrait hydraulique après prise. La déformation totale est alors la somme des déformations élastiques, du retrait hydraulique et du fluage.



$$\text{Fluage final} = \varepsilon_e \cdot \varphi_n \cdot \zeta \text{ avec } \varphi_n = \varphi_0 \cdot \alpha_f \cdot \beta_f$$

$$\varepsilon_e = \frac{\text{contrainte de fluage}}{\text{module de déformation } E_b}$$

$$\text{avec } E_b = 21\,000 \sqrt{\sigma'} \\ \sigma' = \text{résistance en compres}$$

FIG. 1-5

Graphiques pour le calcul du fluage uniaxial en compression. (Recommandation règlement Béton Précontraint 1970).

CHAPITRE 2

CHOIX DES MÉTHODES ET APPAREILLAGES UTILISÉS

Les recherches du CERILH sur le fluage ont commencé début 1967 par la CONFECTION et LA MISE AU POINT de plusieurs types d'appareils adaptés. Ces appareils ont ensuite permis d'effectuer des essais sur des bétons où l'on a fait varier un certain nombre de paramètres.

Mais avant de décrire les appareils réalisés, donnons quelques précisions sur les salles d'essais, la mise au point des matériaux et la définition de certains termes employés.

2.1. MILIEUX D'EXPERIMENTATION ET CHOIX DES MATERIAUX

2.11. Salle d'essais

Plusieurs salles ont été utilisées pour la conservation des éprouvettes :

- une grande pièce où l'humidité relative est en moyenne de 50 % (avec des écarts momentanés ne dépassant pas 5 %) et la température $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Cette pièce dite de « retrait » a un volume de 150 m³ et permet le stockage de :

- 15 000 éprouvettes de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$

- 2 000 éprouvettes de $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}$

soit 13 tonnes de matériaux.

Dans cette pièce sont conservées les éprouvettes de retrait et celles de fluage en compression,

- une nouvelle salle a été spécialement équipée afin de recevoir les nouveaux appareils. Elle a un volume de 50 m³ et est réglée comme la précédente.

La régulation thermo-hygrométrique est assurée à l'aide d'un psychromètre ventilé régulateur composé de thermomètres sec ou humide à contacts électriques commandant les appareils suivants :

- groupe frigorifique
- radiateur à résistance électrique
- assécheur d'air
- humidificateur.

Une régulation de secours pour l'hygrométrie est prévue en cas de défaillance partielle du dispositif décrit (hygromètres à cheveux).

Dans cette salle ont été placées les éprouvettes de fluage en traction, en flexion, en torsion ainsi que celles destinées aux essais d'empreinte (*figure 2-1*).

- Les autres salles existantes utilisées ont été :

- une salle à 5°C et 50 % d'humidité relative

- une salle à 40°C et 50 % d'humidité relative.

- Une armoire de carbonatation réglée à 20°C et 50 % d'humidité relative contenant 70 % en volume de CO₂ (pour l'étude de fluage des éprouvettes carbonatées).

2.12. Mise au point des matériaux

Les éprouvettes à confectionner pour cette étude peuvent être faites en pâte pure de consistance normale, en mortier 1/3 normalisé (ces deux matériaux étant parfaitement définis) et en béton. On a cherché la composition d'un béton aussi régulier que possible et donnant un minimum de dispersion. Après un certain nombre d'essais, la composition suivante a été adoptée (en kgf/m³) :

- ciment : 350

- sable 0,5/1,25 mm : 460

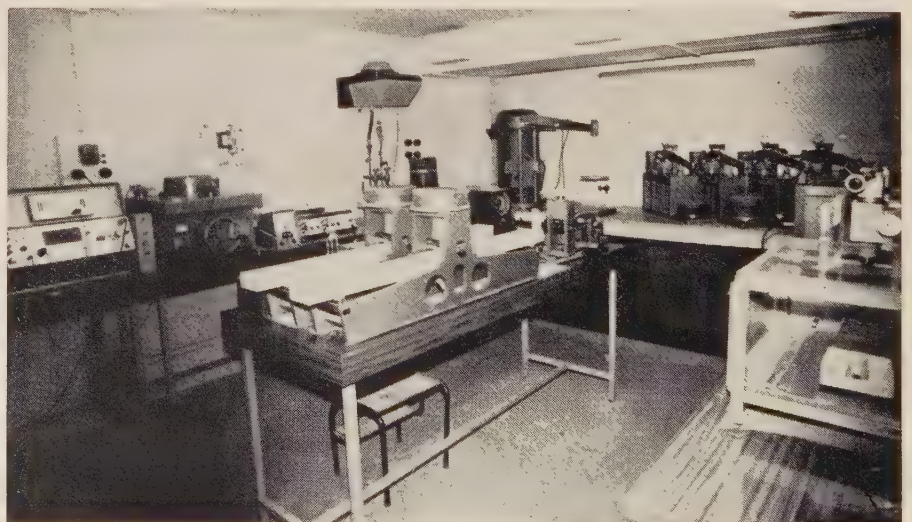


FIG. 2-1

- sable 2/4 : 390
- gravillon 8/20 : 970
- eau : variable suivant les ciments afin

d'obtenir toujours la même plasticité de 3 ± 1 cm d'affaissement au cône d'Abrams.

Le malaxage a été effectué à l'aide d'un malaxeur à contre-courant du type EIRICH de 50 litres de capacité utile et dans les conditions suivantes :

- gâchée de 20 litres correspondant au remplissage de 4 moules à 3 alvéoles (12 éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm)

malaxage à sec : 1 minute

malaxage humide : 4 minutes.

La mise en place a été faite à l'aide d'une table vibrante électrique, expérimentale COUVROT-LAINE, à force vibratoire et amplitude réglables, munie d'un plateau de $1 \times 1,70$ m. Après plusieurs essais cette table a été réglée à une fréquence de 5 000 tr/mn pour une force vibratoire de 1 300 kg correspondant à une amplitude de 0,5 mm (composante verticale, la composante horizontale est pratiquement nulle).

Le démoulage des éprouvettes a eu lieu, comme pour les autres types de matériaux après 24 ± 1 heures de conservation en armoire humide à 20°C .

2.13. Définition de certains termes

Nous aurons à utiliser la notion de module. Les modules qui interviennent dans nos essais peuvent être très différents suivant les vitesses de chargement, le temps d'application des charges... Afin d'éviter toute confusion dans la suite du texte nous conviendrons de prendre les définitions suivantes (figure 2-2) :

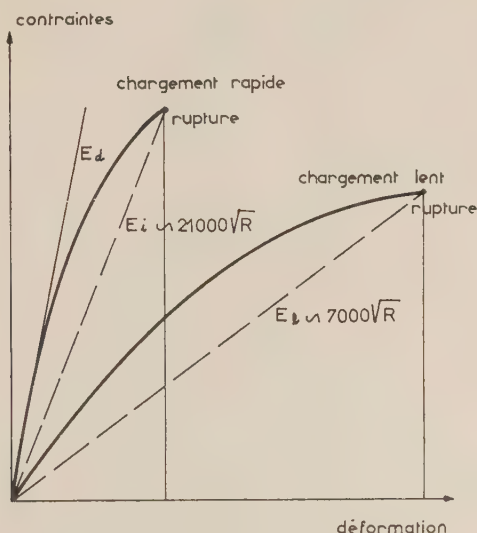


FIG. 2-2 - Définition des modules.
(Dans les formules, R est la résistance à la compression avec chargement rapide).

E_d : MODULE D'ÉLASTICITÉ DYNAMIQUE. C'est la pente de la tangente à l'origine de la courbe de déformation obtenue lors d'un chargement rapide. Ce module correspond pratiquement à celui donné par les méthodes d'auscultation non destructives de mesure de la fréquence propre de résonance.

E_i : MODULE DE DÉFORMATION INSTANTANÉ À LA RUPTURE (cas d'un chargement rapide).

E_l : MODULE DE DÉFORMATION, LENT, statique ou différé ou de fluage à la rupture (il peut varier dans une large mesure).

Habituellement les règlements français indiquent comme valeurs à prendre en fonction de la résistance R du béton :

$$E_i = 21\,000 \sqrt{R}$$

$$E_l = 7\,000 \sqrt{R}$$

A titre indicatif, un béton ayant une résistance en compression de 400 kgf/cm^2 (en chargement rapide), aura :

$$E_d = 555\,000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$E_i = 420\,000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$E_l = 140\,000 \text{ kgf/cm}^2.$$

2.2. APPAREIL DE COMPRESSION MONO-AXIALE

2.2.1. Description des appareils

Environ 100 bâtis, modèle CEBTP (sur un principe donné par RÜSCH) ont été achetés en 2 ans à la S.A.T.T.E.C. (12, rue Brancion - Paris-15^e). Le bâti se compose de 4 colonnes filetées qui assurent le contact de l'éprouvette d'essai, d'une part avec le piston supérieur, et d'autre part avec le plateau inférieur. Le chargement est effectué par pression d'huile réglable au moyen d'un volant et un manomètre indique la pression exercée.

Les manomètres utilisés sont du type PROTAIS (gradués de 10 en 10 bars de 0 à 300 bars) ou du type BLONDELLE (gradués de 2 en 2 bars de 0 à 200 bars). Ces bâtis sont conçus pour des éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm : la figure 2-3 montre un schéma de l'appareil et les figures 2-4 et 2-5 des photos après positionnement et chargement de l'éprouvette. (Une vue partielle d'une salle est donnée sur la figure 2-6).

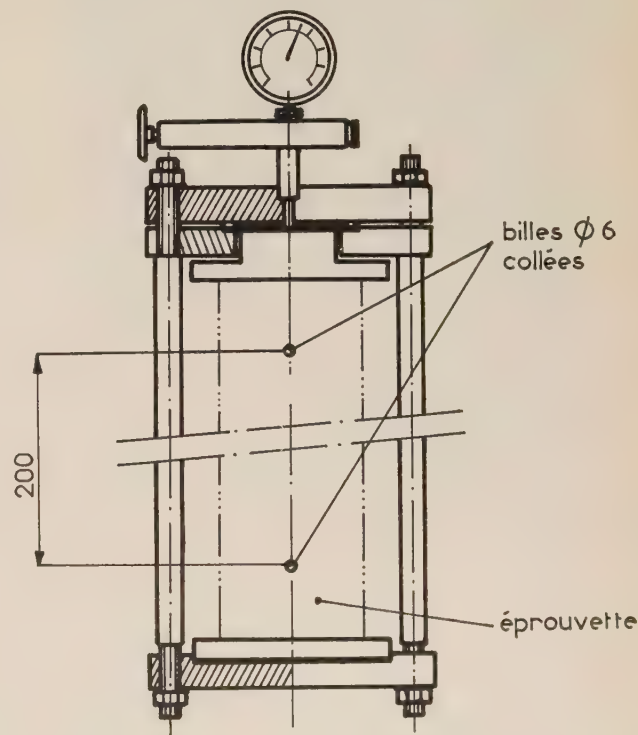


FIG. 2-3 - Schéma du bâti de chargement pour la mesure du fluage en compression. Modèle du C.E.B.T.P.

Deux billes en acier inoxydable de 6 mm de diamètre servant de plots de mesure sont collées sur deux faces latérales opposées de l'éprouvette d'une distance de 20 cm. Cette opération nécessite beaucoup de soin. La pose des bases de mesure se fait au moyen de barrettes en duralumin, comportant deux trous de 5 mm de diamètre à une distance de 20 cm en face

desquels sont collés deux petits aimants servant à maintenir les billes jusqu'à leur fixation définitive sur l'éprouvette. On nettoie d'abord à l'acétone les billes ainsi que les emplacements de collage, on dépose ensuite sur ces derniers une petite quantité de colle (métolux ou résine epoxy), et la barrette munie de ses deux billes est mise en place, les billes venant se poser sur la colle. La barrette est maintenue parallèle à la surface de l'éprouvette par fixation au moyen d'une bande d'adhésif, jusqu'au durcissement de la colle (30 minutes environ à 20° C pour le métolux). Une technique spéciale de fixation des billes a été appliquée pour les éprouvettes devant être constamment immergées dans l'eau. L'appareil de mesure est un « déformètre à billes » (figure 2-7). Il comporte un bâti en duralumin portant l'appareil de mesure (un comparateur à graduations espacées de 2 microns) et un bras en acier trempé fixé sur le bâti par son extrémité supérieure. Deux logements coniques sont réalisés, l'un à l'extrémité du bâti opposé au bras et l'autre à la partie mobile du bras. Ces logements viennent recevoir les billes de 6 mm servant de base de mesure.

surtout fréquente dans les premiers jours qui suivent la mise en charge.

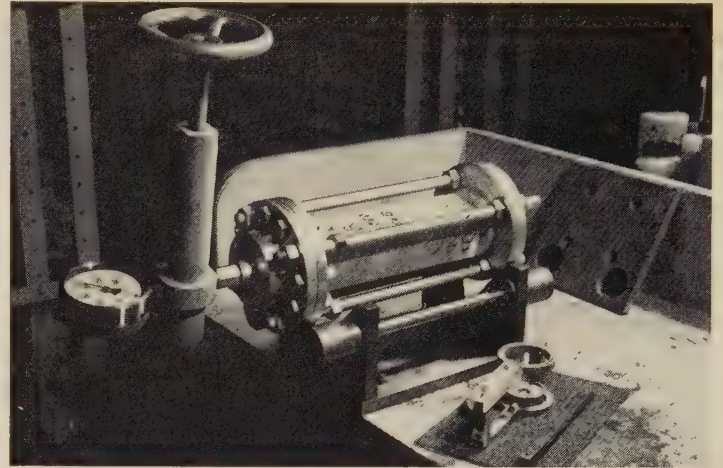


FIG. 2-5

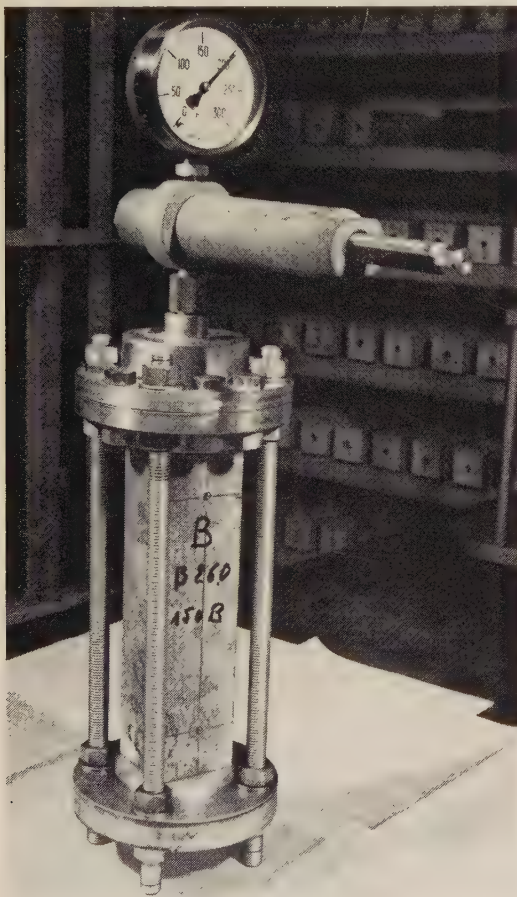


FIG. 2-4

On compare la longueur de la base de mesure à celle d'une base de longueur constante réalisée de la même façon par deux billes collées sur une barre d'invar et servant d'étalon. L'appareil peut mesurer des variations de longueur de ± 1 mm pour une base de 20 cm avec une précision de ± 6 microns. Lorsque l'éprouvette à essayer a atteint l'âge de chargement, elle est comprimée entre les deux plateaux de l'appareil de fluage. Des mesures sont effectuées en cours de chargement pour vérifier le centrage. Il faut que la différence entre le raccourcissement observé sur la face 1 et la face opposée 2 soit inférieur à 2 microns. Un décentrage éventuel peut être rattrapé en agissant sur les écrous de positionnement des colonnes.

Le principal inconvénient de ces appareils, par ailleurs bien au point, est la nécessité de rétablir périodiquement, du fait du fluage, la valeur de la contrainte choisie. Cette opération est

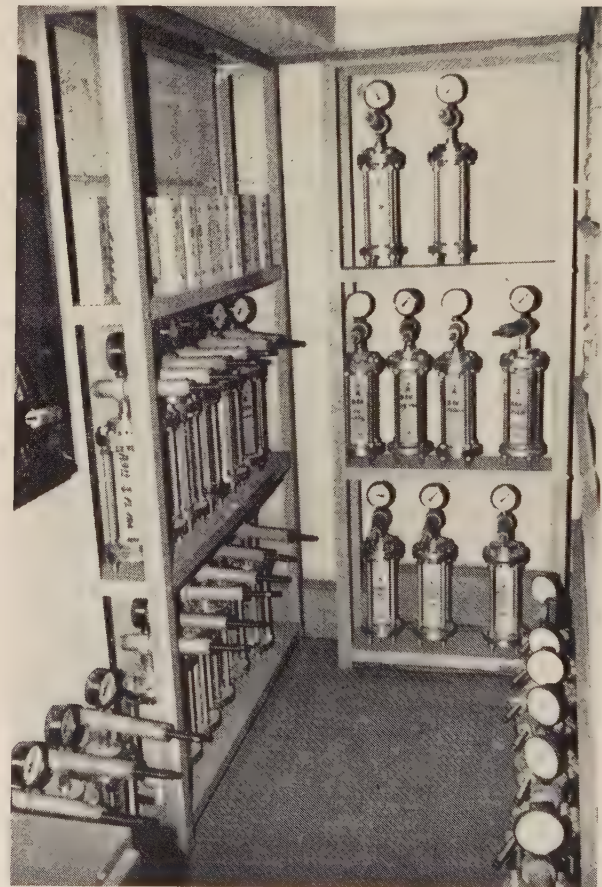


FIG. 2-6

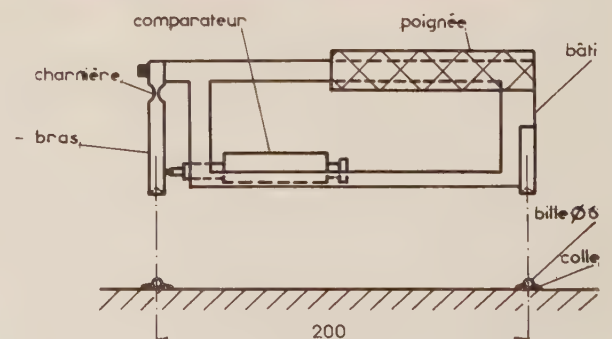


FIG. 2-7 - Schéma du déformètre. Modèle du C.E.B.T.P.

2.22. Dispersion des résultats

Afin d'avoir des valeurs de dispersion et une idée des déformations sous charge, on a confectionné un lot de 30 éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm en béton 0/20 mm dosé à 350 kg de ciment CPA 400 ; puis on a sélectionné d'après leur poids et leur aspect 19 éprouvettes destinées aux essais de fluage. Ces éprouvettes ont été conservées dans l'eau à 20°C puis placées dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20°C puis chargées à 100 kgf/cm^2 sous les bâtis de fluage. Sur ces 19 éprouvettes :

— 17 ont été rompues en compression après 28 jours à l'air (c'est sur cette série que portent les calculs de dispersion),

— 1 éprouvette a été rechargée après 7 jours dans l'air, à $+50\text{ kgf/cm}^2$ (c'est-à-dire à 150 kgf/cm^2), afin d'avoir des ordres de grandeur des fluages que l'on pourrait obtenir dans le temps.

Les résultats moyens obtenus sont donnés sur la figure 2-8. On voit que le FLUAGE TOTAL (RETRAIT COMPRIS) EST A PEU PRÈS PROPORTIONNEL AU LOGARITHME DU TEMPS ENTRE 1 ET 100 JOURS pour une contrainte appliquée de 100 kgf/cm^2 (soit environ 4 fois la déformation instantanée).

Le tableau 2-1 donne la dispersion obtenue à 28 jours sur les 17 éprouvettes. On constate que cette dispersion est beaucoup plus faible sur les mesures de fluage (coefficient de variation de 2,4 %) que sur les mesures de résistances en compression (coefficient de variation de 10,5 %). ON A CHERCHÉ À RELIER, SUR CETTE SÉRIE D'ÉPROUVETTES, LES VALEURS DES RÉSISTANCES MÉCANIQUES EN COMPRESSION OBTENUES SUR LES MÊMES

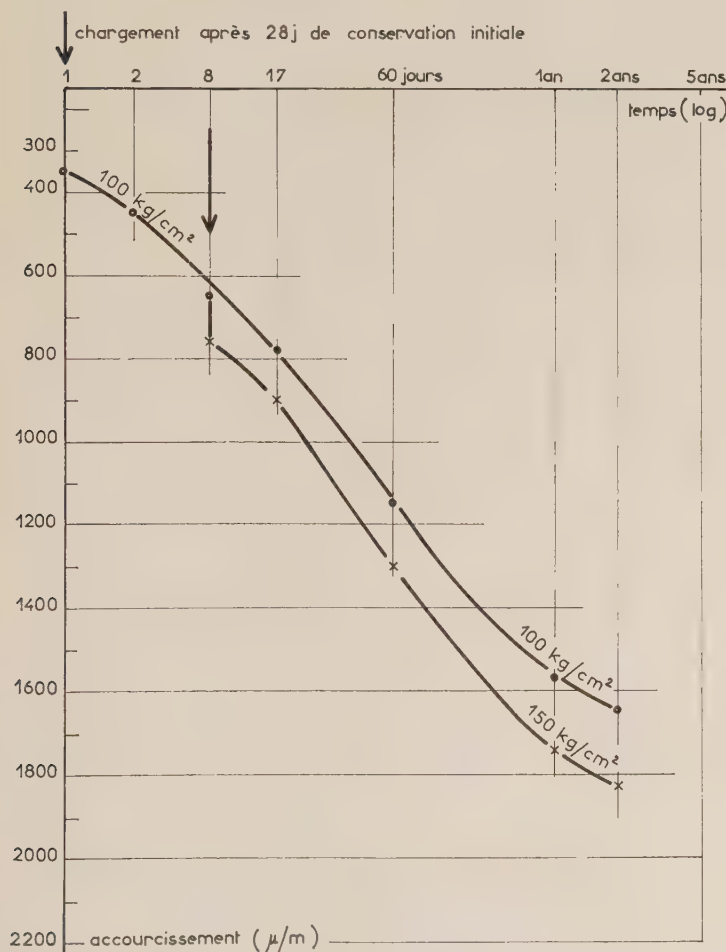


FIG. 2-8 - Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm. Béton 0/20 mm dosé à 350 kg de ciment. Conservation préalable 28 j. dans l'eau à 20°C , puis air (20°C - 50 % d'H.R.).

TABLEAU N° 2-1

Dispersion des essais de fluage

Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm — Béton 0/20 mm

Conservation : 28 j. dans l'eau à 20°C

28 j. dans l'air à 50 % d'H.R.

N° des éprouvettes	Fluage (μ/m) (ordre décroissant) x	Résistance en compression (kgf/cm^2) y
7	1008	516
12	996	534
4	972	558
16	972	564
3	966	580
9	966	580
10	960	594
14	954	650
15	948	650
1	948	670
13	942	684
26	942	686
32	942	688
17	930	690
8	930	714
5	930	720
11	918	720
Moyenne $\bar{x}, \bar{y}$	954	635
Ecart types σ_x, σ_y	23,2	66,98
Coefficient de variation V %	2,4	10,5

ÉPROUVETTES. La figure 2-9 montre qu'il y a une très bonne corrélation entre fluage et résistance mécanique. Plus la résistance est élevée et plus la déformation sous charge est faible.

Le coefficient de corrélation linéaire r de PEARSON a été calculé :

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \quad \text{où}$$

$\bar{x}$: moyenne arithmétique des différentes valeurs de x (ici les x représentent les valeurs de fluage).

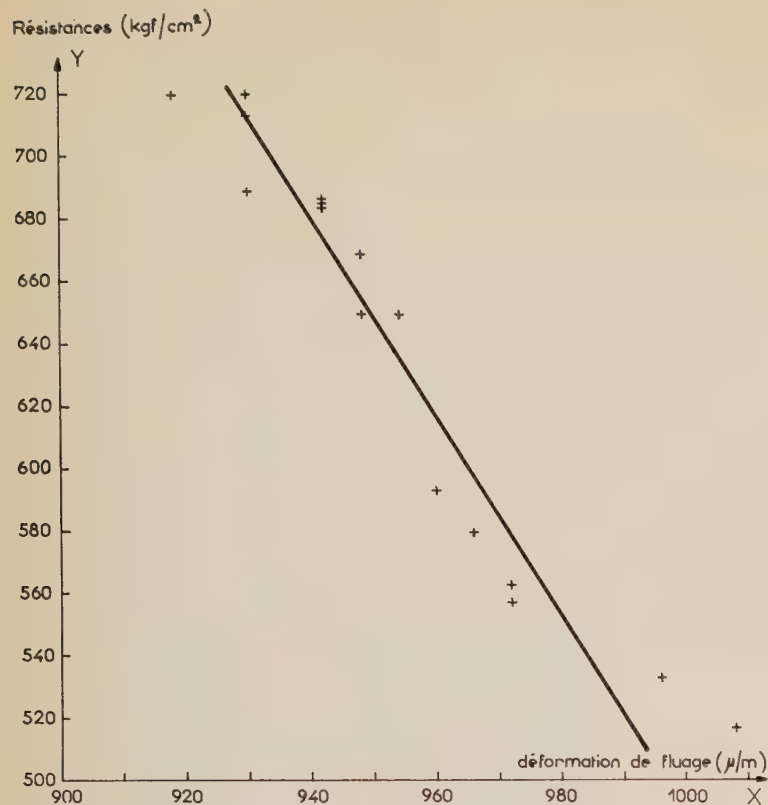


FIG. 2-9 - Relation Résistances mécaniques - fluage en compression. Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm. Béton 0/20 mm. Conservation 28 j. dans l'eau, puis 28 j. dans l'air (20°C - 50 % d'H.R.), sous une pression de 100 kgf/cm^2 .

$\bar{y}$: moyenne arithmétique des différentes valeurs de y (ici les y représentent les valeurs des résistances en compression).

σ_x et σ_y sont les écarts-types des x et des y .

N : nombre de couples (ici $N = 17$).

On a ainsi trouvé $r = 0,96$, ce qui indique que LA CORRÉLATION EST FORTE. L'équation de la droite de régression serait ici : $y = -2,76x + 3\,270$.

2.23. Influence des repères de mesure

On s'est demandé si la façon habituelle d'opérer, qui consiste à mesurer les déformations en se servant de deux billes en acier inoxydable de 6 mm de diamètre collées sur deux faces latérales opposées de l'éprouvette était bien correcte puisque l'on mesure en fait DES DÉFORMATIONS EN SURFACE. A cet effet, on a confectionné des séries d'éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm en mortier 1/3 AFNOR (ciment CPA 400, B 216) munies de différents dispositifs de mesures (figure 2-10) :

- billes collées en surface : méthode classique,
- barres de 8 mm de diamètre traversant entièrement l'éprouvette et à une distance de 20 cm (même distance que les billes),
- plots de retrait de 14 mm de longueur ancrés dans l'axe longitudinal de l'éprouvette.

Les éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm ont été placées par série de 3, d'abord 7 jours dans l'eau à 20°C , puis dans l'air à 20°C et 50 % d'humidité relative (retrait libre et chargement pour le fluage) :

SÉRIE N° 1 : éprouvettes, de retrait libre, munies de plots et de billes,

SÉRIE N° 2 : éprouvettes, de retrait libre, munies de billes et de barres,

SÉRIE N° 3 : éprouvettes chargées à 150 bars en compression à 7 jours et comportant à la fois billes et barres.

Les résultats obtenus sont donnés au *tableau 2-II*. On voit que les mesures effectuées sur billes collées sont très légèrement plus élevées que celles sur barres ou plots à 7 jours mais qu'ensuite la différence devient tout à fait négligeable et de l'ordre de grandeur de la précision des mesures. On peut donc bien continuer à mesurer les éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm (retrait libre et fluage) à l'aide de billes collées en surface.

TABLEAU N° 2-II

Méthode de mesure : comparaison entre plot, bille et barre

Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm

Mortier 1/3 AFNOR : 7 jours dans l'eau puis air à 50 %

Chargement à 7 jours : 150 bars

(en μ/m)

Essais	Retrait libre				Fluage sous 150 bars	
Systèmes	Plot-bille (série n° 1)	Bille-barre (série n° 2)		Bille-barre (série n° 3)		
Temps (jours)	Plot	Bille	Bille	Barre	Bille	Barre
7	280	340	320	290	1430	1400
28	650	655	670	655	2270	2200
90	900	890	910	900	2920	2840

Médianes de 3 éprouvettes

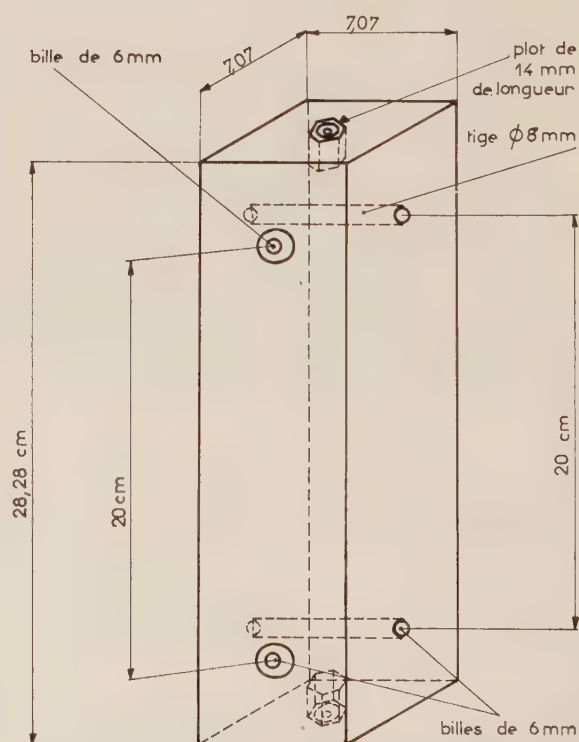


FIG. 2-10 - Influence des plots et tiges de mesure. Eprouvette de $7 \times 7 \times 28$ cm.

REMARQUE

L'influence de la « peau » des éprouvettes serait certainement plus sensible sur des prismes de plus grande dimension et surtout pour des mesures aux tout premiers âges.

2.24. Moyens d'améliorer les mesures et de réduire les dispersions

L'expérience nous a montré qu'il fallait prendre un certain nombre de précautions afin d'avoir des mesures le moins dispersées possibles et de pouvoir comparer certains phénomènes intéressants entre eux.

— ECHANTILLONNAGE DES ÉPROUVETTES

Les éprouvettes de béton ne sont pas toutes identiques surtout d'une gâchée à l'autre. Etant donné le prix élevé des mesures qui suivent il est avantageux de confectionner une série plus importante d'éprouvettes afin d'en SÉLECTIONNER un LOT HOMOGÈNE. On pourra alors espérer avoir de meilleures corrélations puisque certaines de ces éprouvettes seront mises sous charge, d'autres essayées en compression, et que d'autres seront destinées au retrait hydraulique... L'échantillonnage pourra s'effectuer AU DÉMOULAGE des éprouvettes suivant les 2 CRITÈRES suivants qui sont des méthodes non destructives :

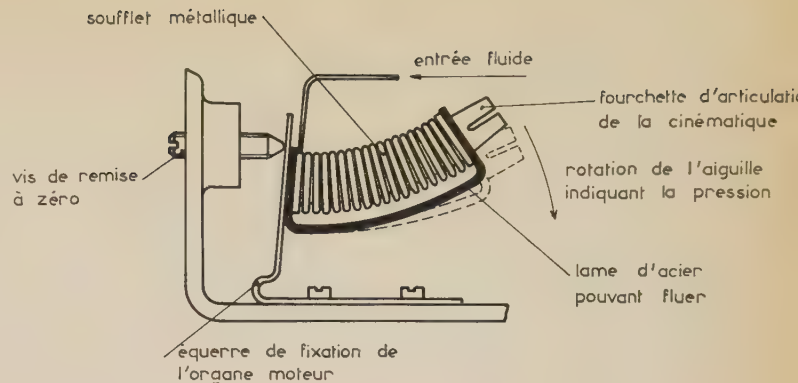
- POIDS
- VITESSE DU SON.

Les éprouvettes aberrantes seront jetées (environ 50 % d'un lot).

A cet effet, nous nous sommes équipés d'un appareil de vitesse du son perfectionné dont le principe a été donné par JONES et GATFIELD. L'appareil produit des impulsions ultrasoniques grâce à un cristal de quartz piezo-électrique excité par chocs (fréquence de 50 par seconde). Ces impulsions sont transmises à un transducteur à cristal de titanate de baryum et envoyées dans le béton. Les impulsions ayant traversé l'éprouvette sont reçues par un autre transducteur identique puis amplifiées. La lecture du temps se fait facilement en observant l'image du train de vibration reçu sur un oscillogramme. On en déduit la vitesse du son (comprise par exemple entre 3 500 et 4 500 m/s) avec une précision de l'ordre de ± 30 m/s. L'avantage de cet appareil est de donner des indications très précises pour des bétons jeunes ayant des résistances mécaniques assez faibles (la courbe vitesse du son en fonction de la résistance en compression a une grande pente au départ et s'infléchit ensuite pour de fortes résistances mécaniques).

— Etalonnage des manomètres

La valeur de la force appliquée doit rester constante dans le temps. Pour tenir compte du fluage du béton on rectifie manuellement la pression de façon que les manomètres affichent toujours la même valeur. On peut cependant penser qu'un manomètre — aussi bon soit-il — est susceptible de FLUER sous charge puisque les pièces constitutives en acier sont aussi sous charge et peuvent fluer. On comprend dès lors l'intérêt d'UN ÉTALONNAGE PÉRIODIQUE (tous les 6 mois par exemple) de ces manomètres, si l'on veut avoir la certitude des valeurs données du fluage à long terme. Cela se pratique peu ou pas dans les laboratoires. Nous proposons d'opérer suivant les schémas donnés figure 2-11 et de modifier en conséquence les bâtis actuels. Un flexible haute pression relie la capacité d'huile du bâti sous pression au circuit hydraulique d'une balance manométrique. La vanne haute pression étant fermée, on fait croître la pression à l'intérieur de la balance jusqu'à la valeur qu'indique le manomètre (100 bars par exemple). En ouvrant la vanne l'équi-



Principe des manomètres à "lame d'acier" utilisée.
(D'après notice Blondelle).

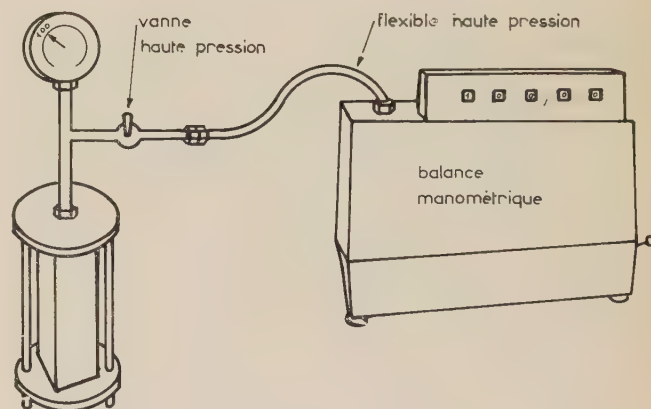


FIG. 2-11 - Etalonnage périodique des manomètres à l'aide d'une balance manométrique automatique à affichage numérique.

libre de pression s'établit. On lit alors par exemple sur le compteur de la balance 98 bars, on règle alors l'aiguille du manomètre (ce qui n'est possible qu'avec certains types de manomètres qu'il faut choisir en conséquence), face à la graduation 98. On ferme la vanne et l'on abaisse la pression dans le circuit hydraulique de la balance. Si les bâtis sont équipés comme il est indiqué sur le graphique de la figure donnée, l'étalonnage S'EFFECTUE RAPIDEMENT, chaque fois qu'on le désire ET SANS AVOIR À DÉCHARGER les éprouvettes placées sur bâti.

— Limite de la charge appliquée

La charge MAXIMALE à appliquer ne devrait pas dépasser la moitié de la charge de rupture instantanée pour les deux raisons suivantes :

1) l'éprouvette est sollicitée dans le sens VERTICAL, son élanement est de 4 d'où une résistance en compression de 15 à 25 % inférieure à celle obtenue dans le sens HORIZONTAL habituel (suivant la résistance propre de l'éprouvette, la perte de résistance semble être proportionnellement plus importante avec des éprouvettes ayant de faibles résistances mécaniques).

2) la résistance sous charge très lente (plusieurs jours) peut être les 3/4 de la résistance instantanée sous presse.

C'EST GRACE À L'EXPÉRIENCE DE NOS PREMIERS ESSAIS QUE NOUS AVONS PU ÉNONCER CES QUELQUES PRINCIPES DEVANT AMÉLIORER NOS MESURES. CES PRINCIPES SERONT PAR LA SUITE RESPECTÉS POUR TOUTES NOS ÉTUDES DE FLUAGE.

2.3. APPAREILS DE FLEXION

Deux types d'appareils ont été construits par l'atelier du CERILH suivant nos plans :

— PREMIER APPAREIL (figure 2-12). C'est une balance de fluage pour éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm, d'un modèle analogue à la balance de Michaelis pour rompre en traction-flexion des éprouvettes prismatiques. Elle comporte un bras de levier de 10 et elle est chargée à l'aide de poids en fonte ou en plomb. Il permet d'effectuer des ruptures en traction-flexion sous charge centrale, mais il n'a pas été conçu pour cela. La résistance en traction-flexion est donnée par la formule :

$$TF = \frac{3}{2} \frac{Pl}{bh^2} \quad \text{avec :}$$

P : charge appliquée au centre

l : distance entre appuis (ici $l = 23,57$ cm)

b = h = 7,07 cm (base et hauteur de la section)

d'où
$$TF = \frac{P}{10}$$

Comme le bras de levier est de 10, la contrainte en traction-flexion en kgf/cm² est égale au poids p mis sur la balance (ainsi aucune erreur n'est possible et le calcul est immédiat).

La flèche au centre est donnée par la formule:

$$f = \frac{Pl^3}{48 EI}$$

avec E : module de déformation

$$I : \text{moment d'inertie} = \frac{bh^3}{12}$$

d'où
$$f = \frac{P}{E} \frac{l^3}{4 bh^3}$$

Compte tenu des caractéristiques de l'appareil

$$f_{cm} = 1,30 \text{ cm}^{-1} \frac{P \text{ (kg)}}{E \text{ kgf/cm}^2}$$

EXEMPLE

Pour un poids $p = 30$ kg soit $P = 300$ kg (soit encore une contrainte de traction-flexion de 30 kgf/cm^2), un béton ayant un module instantané $E = 300\,000 \text{ kgf/cm}^2$ aura une flèche instantanée de :

$$f_{cm} = 1,30 \text{ cm}^{-1} \frac{300 \text{ kgf}}{300\,000 \text{ kgf/cm}^2} = 0,0013 \text{ cm}$$

soit 13 microns.

C'est pourquoi l'appareil est muni d'un comparateur gradué au micron (on pourrait d'ailleurs le remplacer par un capteur de déplacement à induction permettant des mesures au $1/10^{\circ}$ de micron et relié à un enregistreur).

On pourrait aussi, afin d'augmenter la précision de la mesure, opérer sur des éprouvettes dont la hauteur serait de 3,5 cm au lieu de 7 cm (la hauteur intervient à la puissance 3 dans la formule de la flèche).

Un seul appareil de ce type a été construit (figure 2-13).

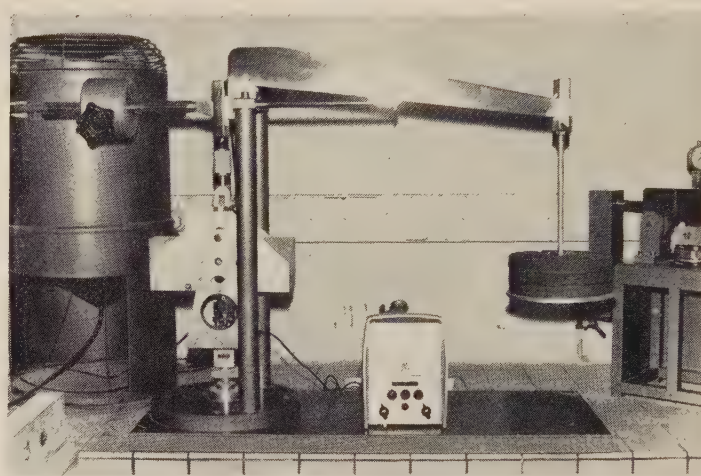


FIG. 2-13

— DEUXIÈME APPAREIL (figure 2-14)

CET APPAREIL EST BEAUCOUP PLUS SIMPLE QUE LE PRÉCÉDENT : la charge totale est appliquée directement au centre d'une éprouvette de 120 cm, reposant sur deux appuis distants de 100 cm. Les éprouvettes essayées sont prismatiques et ont par exemple une section de 5×10 cm. Le comparateur utilisé n'a pas à être aussi précis qu'avec l'appareil précédent ; on a choisi un comparateur gradué de 10 en 10 microns.

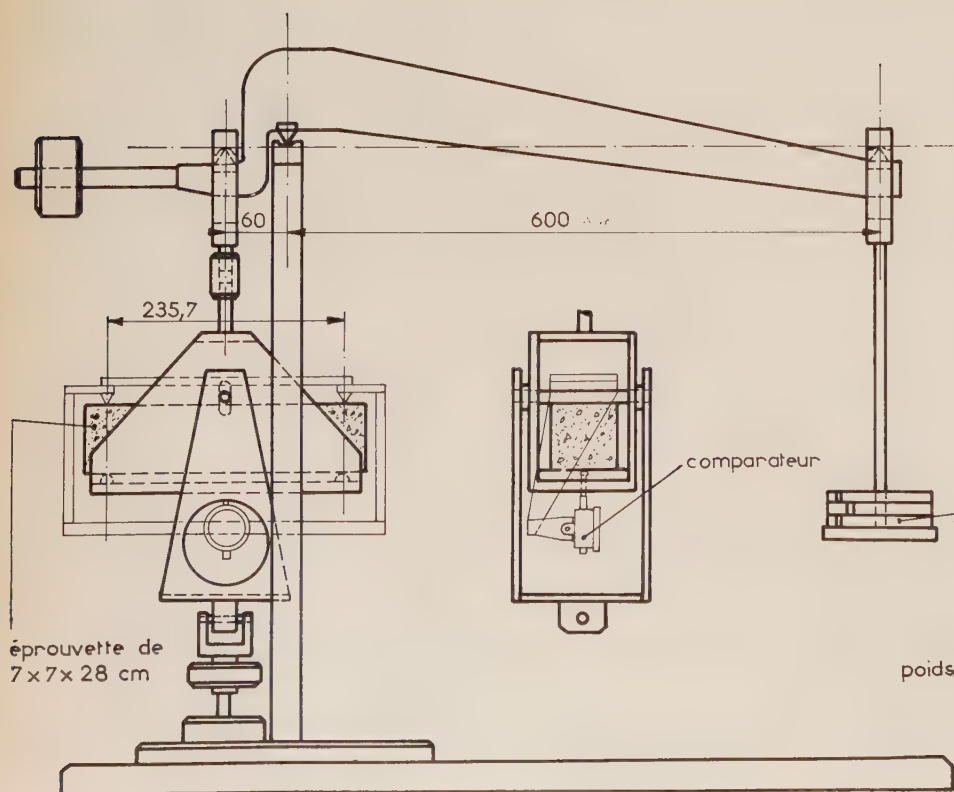


FIG. 2-12 - Balance de fluage (schéma).

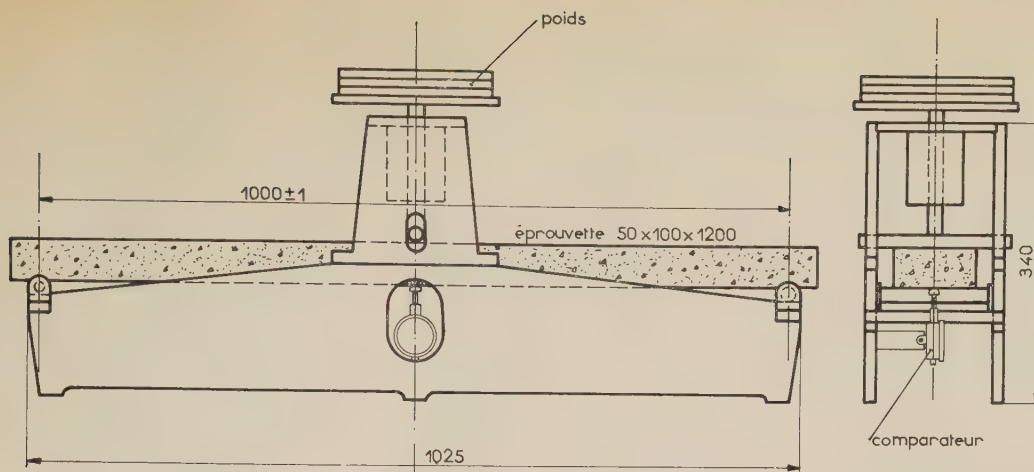


FIG. 2-14. - Fluage en flexion.
(schéma)

La contrainte en traction-flexion est égale à :

$$TF = \frac{3}{2} \frac{Pl}{bh^2} = P \frac{3}{2} \frac{100}{10.5^2} = \frac{3}{5} P \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

La flèche au centre est égale à :

$$f = \frac{P}{E} \frac{l^3}{4bh^3} = \frac{P}{E} \frac{100^3}{4 \cdot 10.5^3} = 200 \frac{P}{E} \text{ (cm)}$$

EXEMPLE

Pour un poids $P = 60 \text{ kg}$, et un béton ayant un module instantané $E = 300\,000 \text{ kgf/cm}^2$ on aura :

— une contrainte en traction-flexion de 36 kgf/cm^2

— une flèche de $f = \frac{200 \cdot 60}{300\,000} = 0,04 \text{ cm}$

soit 400 microns.

Cet appareil a comme inconvénient d'utiliser des éprouvettes de grande dimension, par contre il est peu coûteux à construire, les mesures sont faciles à effectuer et précises. Au total deux séries de 3 appareils de ce type ont été construits. La figure 2-15 montre les moules utilisés pour la confection des poutrelles et la figure 2-16 la vue d'un appareil.

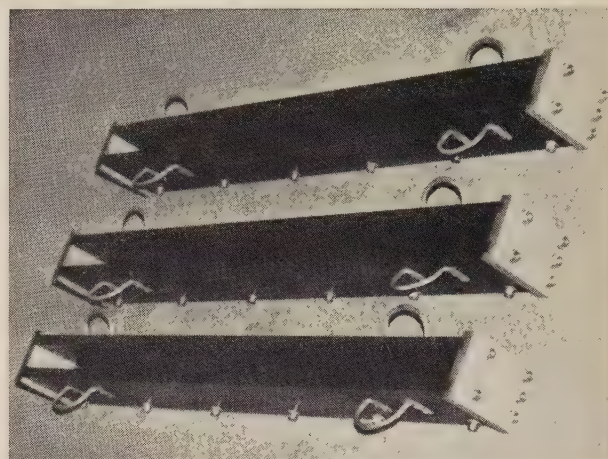


FIG. 2-15

2.4. APPAREIL DE TRACTION

L'ensemble du montage a été conçu par nous-même et construit par l'atelier du CERILH. Il comporte essentiellement un bâti rigide recevant 6 à 8 chapelets de 2 ou 3 éprouvettes (figures 2-17 et 2-18). Des poids situés à la partie inférieure permettent d'exercer sur chaque éprouvette une contrainte constante (l'éprouvette supérieure supporte en plus le poids des deux autres, ce qui est souvent négligeable devant la série de poids appliquée). On a prévu des essais sur éprouvettes de $2 \times 2 \times 28 \text{ cm}$ recevant sur une face deux billes de $\varnothing 6 \text{ mm}$ collées à une distance de 20 cm et selon la même technique que celle utilisée avec les éprouvettes de compression. Les mesures sont effectuées avec un comparateur au micron.

Un calcul rapide montre que LES DÉFORMATIONS A MESURER SONT FAIBLES. En effet, soit une éprouvette ayant une résistance en rupture à la traction de 60 kgf/cm^2 . En supposant que le module de déformation instantané soit — comme dans le cas de la compression — de $300\,000 \text{ kgf/cm}^2$, l'allongement instantané sera pour une contrainte de 20 kgf/cm^2 de :

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{20}{300\,000} \approx 0,07 \text{ mm/m soit } 70 \mu\text{/m}$$

soit encore 14 microns pour 20 cm (base de mesure). Or l'allon-

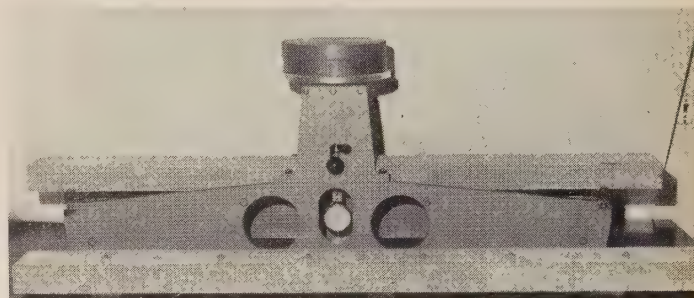


FIG. 2-16

gement de fluage à 6 mois pourra être égal à 3 fois l'allongement instantané soit $210 \mu\text{/m}$.

La mesure avec un comparateur au micron n'est donc pas suffisamment précise puisque, compte tenu de la base de mesure la précision est de l'ordre de 6 microns par mètre. C'est pourquoi nous essayons une autre méthode dont le principe a été donné en France en 1928 par A. COYNE et qui est celle des extensomètres acoustiques. L'essai consiste à coller sur une des faces de l'éprouvette deux mordaches fixes servant à positionner et à maintenir un fil d'acier tendu jouant le rôle de corde vibrante ou encore appelé témoin sonore (figure 2-19). Les variations de longueur de l'éprouvette sont transmises à ce fil et en modifiant la tension. Le fil est mis en vibration permanente lors de chaque mesure par un électro-aimant. Un deuxième électro-aimant sert à compter le nombre de vibrations par seconde

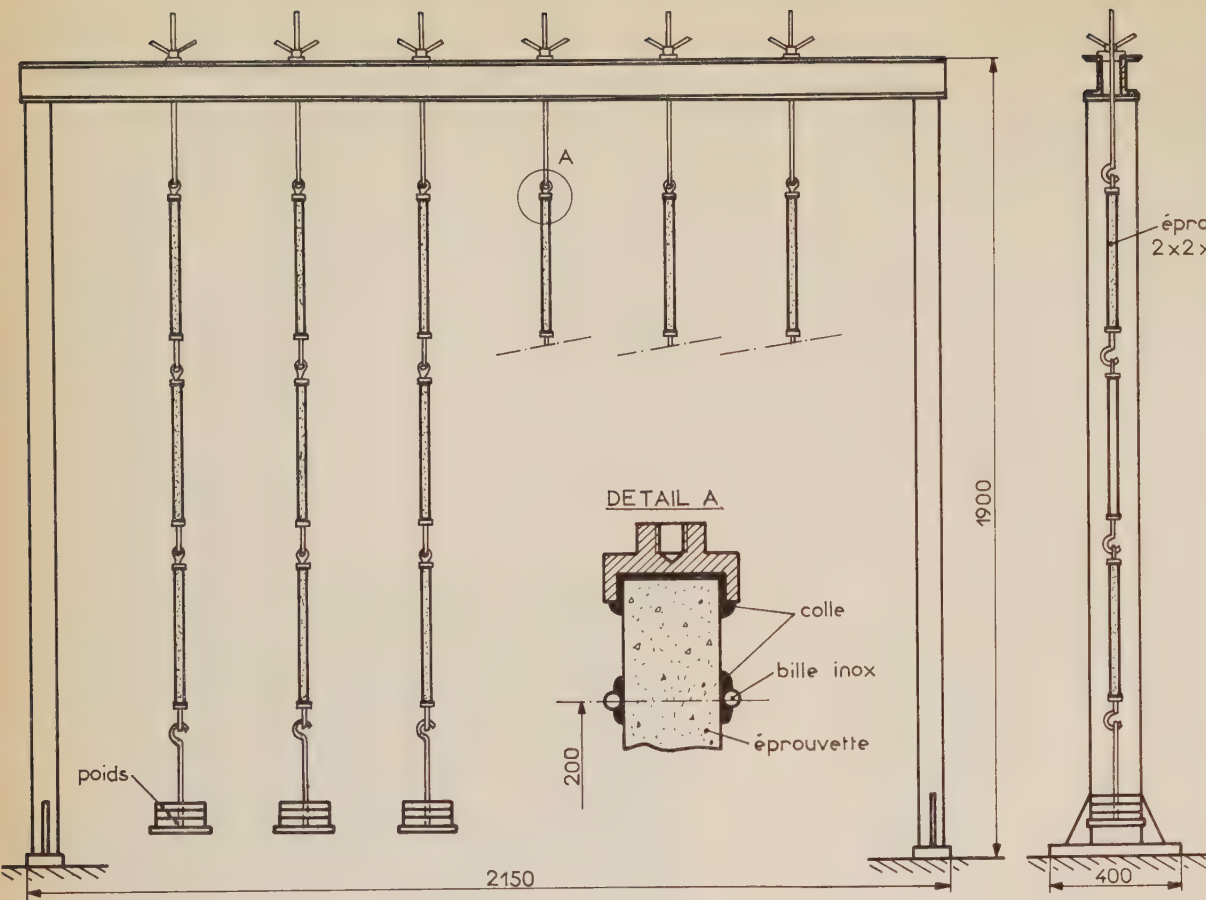


FIG. 2-17 - Fluage en traction (schéma).



FIG. 2-19

de la corde vibrante. Le poste d'écoute utilisé comporte en fait une corde étalon de longueur L montée sur un banc micro-métrique. Lors de la mesure il y a excitation entretenue simultanée de cette corde étalon et de la corde vibrante montée sur

l'éprouvette. La tension de la corde étalon du poste d'écoute se modifie de façon à obtenir l'unisson. Les appareils actuels fonctionnent automatiquement. Ils sont munis d'un pont de wheatstone pour corriger les variations éventuelles dues aux écarts de température et comportent un poste de comptage électronique d'impulsions permettant la lecture directe et immédiate par affichage numérique figure 2-20.

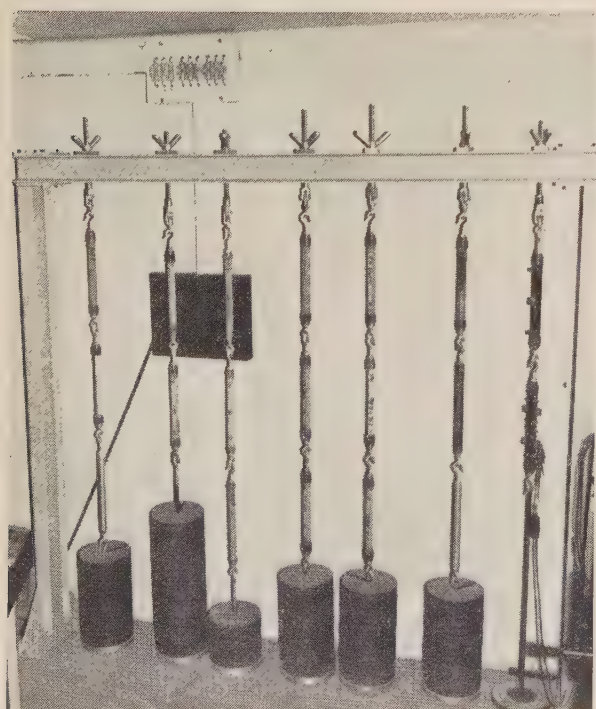


FIG. 2-18

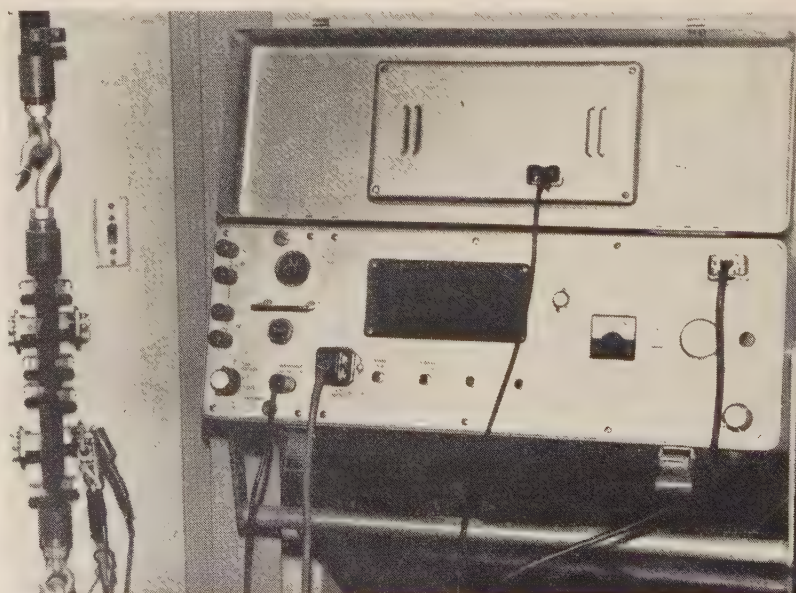


FIG. 2-20

REMARQUE

Rappelons que la fréquence propre de vibration f d'une corde tendue de longueur l est égale à :

$$f = \frac{V}{2l} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{Fg}{\omega}} \text{ avec}$$

V : vitesse de propagation de l'ébranlement transversal le long de la corde

F : tension de la corde

ω : poids spécifique de la corde en g/cm (en CGS).

On montrerait que l'allongement élastique relatif $\frac{\Delta l}{l_0}$ de la corde de longueur initiale l_0 est proportionnel à la différence des carrés des fréquences. En effet soit une corde au repos de longueur l_0 (tension nulle $F=0$). Pour une tension F_1 la longueur devient $l_1 = l_0 + \Delta l_1$ et la fréquence de vibration de la corde est alors :

$$f_1 = \frac{1}{2l_1} \sqrt{\frac{F_1 g}{\omega}} \simeq \frac{1}{2l_0} \sqrt{\frac{F_1 g}{\omega}}$$

On sait que $F_1 = E \frac{\Delta l_1}{l_0}$ d'où

$$\frac{\Delta l_1}{l_0} = 4 l_0^2 \frac{\omega}{E \cdot g} f_1^2 = K f_1^2$$

Pour une autre déformation Δl_2 telle que $l_2 = l_0 + \Delta l_2$ on aurait de même :

$$\frac{\Delta l_2}{l_0} = K f_2^2.$$

Toute différence de déformation $\Delta l = \Delta l_2 - \Delta l_1$ s'obtient alors par la formule pratique suivante :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = K (f_2^2 - f_1^2).$$

On voit que Δl se déduit facilement de cette formule puisque l'on connaît l_0 , K et que l'appareil donne directement les fréquences f_1 et f_2 correspondant à 2 mesures différentes (par exemple f_1 mesure initiale et f_2 mesure après chargement de l'éprouvette).

EXEMPLE

Les mesures de fluage en traction avec une corde de longueur $l_0 = 90$ mm donnent une fréquence $f_1 = 521,3$ Hz à 1 jour et une fréquence $f_2 = 532,5$ Hz à 28 jours. La déformation correspondante entre 1 et 28 jours serait, compte tenu des caractéristiques des cordes et de l'appareil :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = 1562,5 \times 10^{-10} \times l_0^2 \times (532,5^2 - 521,3^2) = 14,9 \mu/m$$

PRÉCISION DE LA MESURE

Le poste d'écoute permet de lire $\frac{1}{10}$ Hz. En admettant que l'opérateur donne une appréciation de 0,5 Hz, que la corde a $l_0 = 90$ mm et que la fréquence lue est de 200 Hz, on aurait :

$$\frac{\Delta l}{l_0} = 1562,5 \times 10^{-10} \times 90^2 \times (200,5^2 - 200^2) = 0,25 \mu/m$$

soit pour un exemple moyen une PRÉCISION 25 FOIS MEILLEURE qu'avec le comparateur mécanique.

TENSION DE LA CORDE

La tension est égale à $F = \frac{4 f^2 l^2 \omega}{g}$. Les cordes utilisées

pèsent 0,38 g au mètre (soit $\omega = 0,0038$ g/cm) et ont une longueur de 9 cm. La fréquence moyenne est par exemple de 500 Hz d'où :

$$F = \frac{4 \cdot 500^2 \times 81 \times 0,0038}{981} = 300 \text{ g soit } 0,3 \text{ kg.}$$

La corde a une section de 0,05 mm² soit une tension de 6 kg/mm². On est donc loin de la limite élastique de l'acier.

PRÉCAUTIONS OPÉRATOIRES

Afin d'avoir des mesures fidèles et qui restent sensibles dans le temps, un certain nombre de précautions sont à prendre :

— les cordes ne doivent pas rouiller et doivent être protégées en conséquence (dans le cas de nos essais effectués dans une atmosphère à 50 % d'humidité relative, l'acier ne rouille pratiquement pas) ;

— les cordes ne doivent pas elles-mêmes fluer dans le temps. Il faut donc s'en assurer et prévoir les rectifications nécessaires pour tenir compte de la relaxation des aciers. Nous avons d'ailleurs un dispositif qui a été mis au point et qui permet de coupler les mesures faites à l'extensomètre acoustique avec des mesures faites à l'aide d'un comparateur mécanique (figure 2-21) et cela afin d'éviter des erreurs importantes. On peut aussi périodiquement changer les cordes. Il faudra vérifier dans le dispositif proposé que la colle ne flue pas sous la tension de la corde.

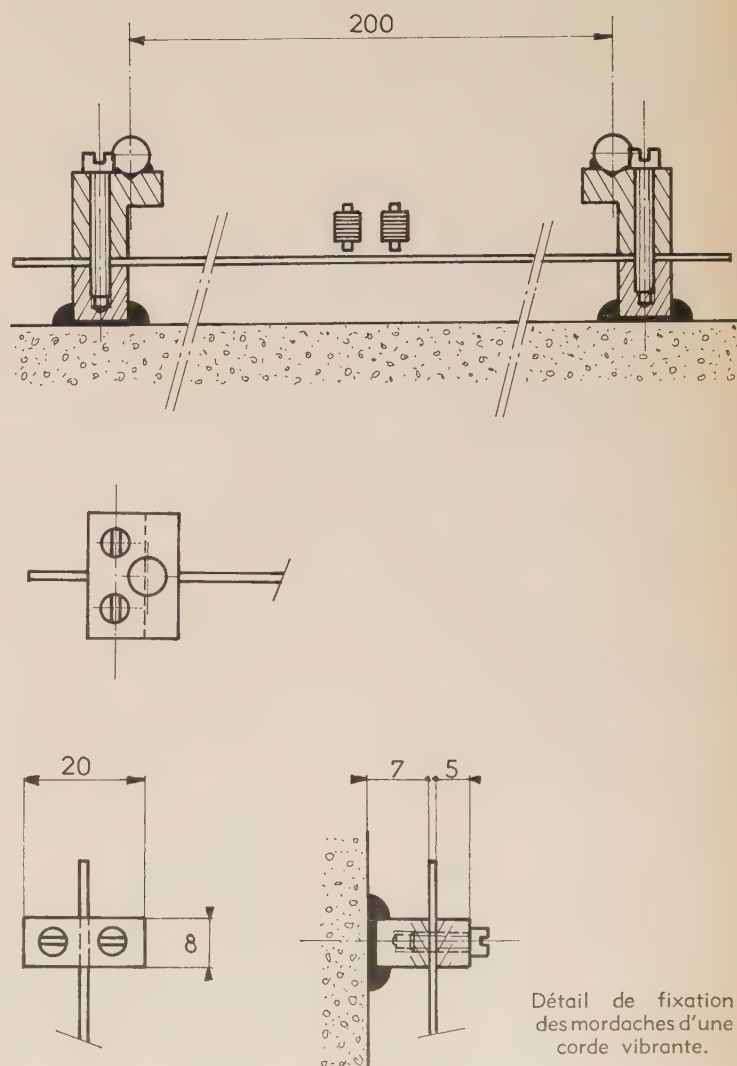


FIG. 2-21

Dispositif de mesure de déformation par couplage déformètre à billes corde vibrante.

2.5. APPAREIL DE TORSION

Cet appareil a été construit suivant le schéma donné sur la figure 2-22 et suivant nos plans à l'atelier du CERILH. Il permet l'étude d'éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 30 cm de long en pâte pure, mortier ou micro-béton (des moules en plastique ont été fabriqués pour confectionner ces éprouvettes : figure 2-23).

L'appareil est constitué par :

- un mandrin fixe,
- un palier mobile,
- un dispositif de chargement.

Les deux extrémités de l'éprouvette sont collées à la résine époxyde dans une bague de 3 cm de long. L'une des bagues est clavetée sur le mandrin « fixe » en rotation (mais qui peut librement se déplacer longitudinalement), l'autre sur le palier mobile. Ces fixations par clavetage sont complétées par des vis de serrage de sécurité. Le palier mobile est solidaire d'un arbre de transmission reposant sur deux roulements à billes fixés sur le bâti rigide. Le dispositif de chargement est constitué par un bras de levier équilibré de $L = 20$ cm de long fixé sur l'arbre de transmission. Un plateau de chargement de 5 kg repose sur l'extrémité du bras de levier et reçoit les disques de chargement (5 kg unitaire par exemple). On peut facilement placer jusqu'à $P = 60$ kg d'où un couple de torsion maximum de 12 kgm, soit une contrainte de torsion de $\sigma = 48,8$ kgf/cm². Deux bagues de contrôle distantes de $l = 15,6$ cm sont munies de tiges s'appuyant sur des comparateurs C_1 et C_2 au micron. Elles sont positionnées à l'aide d'un guide posé sur le mandrin et le palier mobile et fixées solidement grâce à 4 points de contact

visés. Elles sont placées à 4,2 cm des extrémités de l'éprouvette afin d'éviter les effets de bout ; la distance entre l'axe longitudinal de l'éprouvette et le palpeur du comparateur est de $l' = 20$ cm. L'appareil comporte également d'autres comparateurs (un à chaque extrémité) permettant la mesure du retrait axial de l'éprouvette. La vérification de l'appareil se fait avec une éprouvette cylindrique en acier. La figure 2-24 donne une

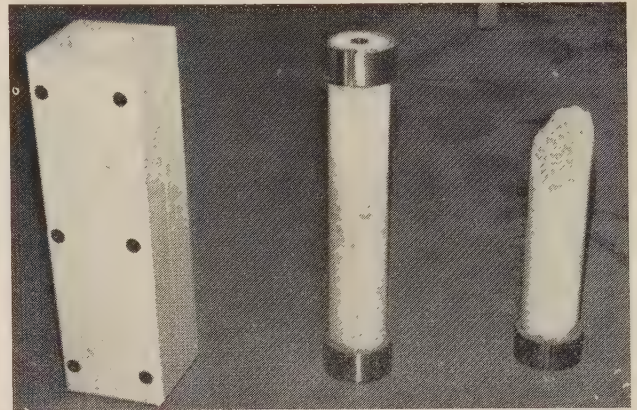


FIG. 2-23

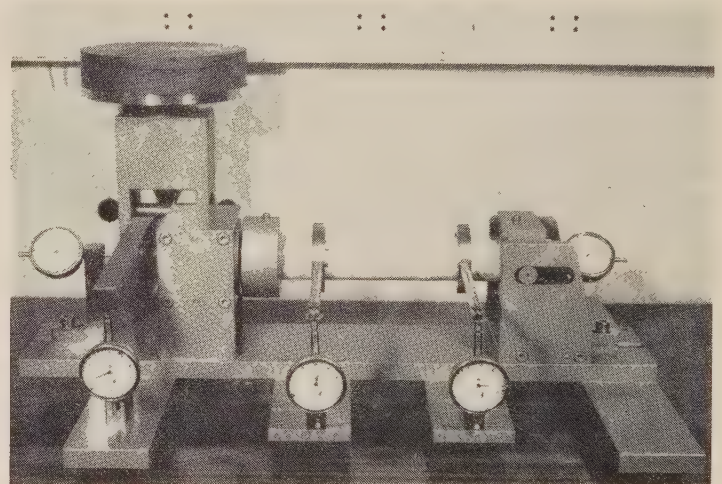


FIG. 2-24

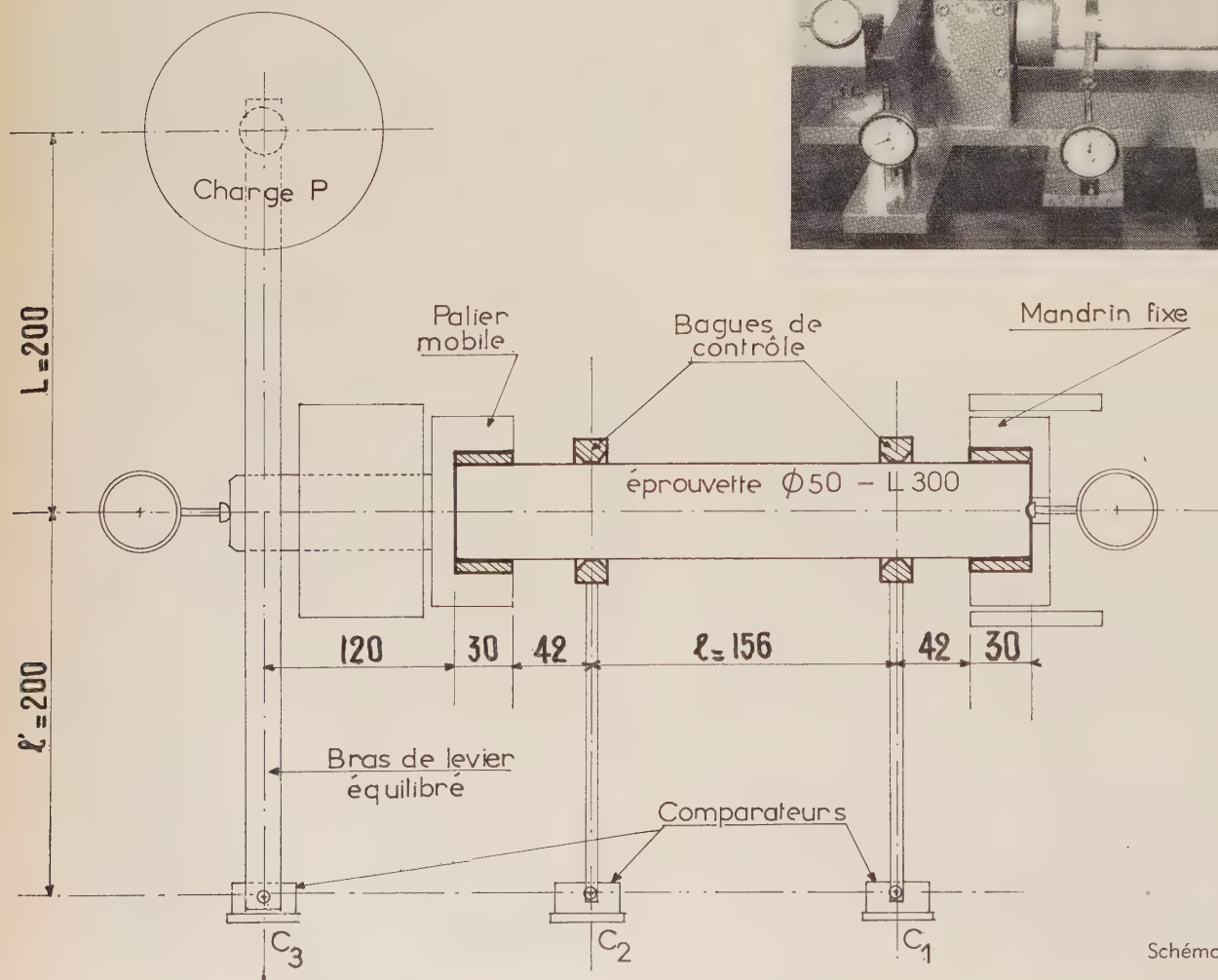


FIG. 2-22

Schéma de principe d'appareil de torsion.

vue de cet appareil original. Il permet également de rompre en torsion les éprouvettes mais il n'a pas été fabriqué pour cet usage.

Rappelons les formules classiques de résistance des matériaux, valables lorsque l'on reste dans le domaine élastique :

CONTRAINTES DE TORSION

$$\sigma = \frac{M}{\left(\frac{I}{r}\right)} \quad \text{avec } M = PL = \text{moment de torsion}$$

$P = \text{charge appliquée}$
 $L = 20 \text{ cm (bras de levier)}$

$$I = \frac{\pi d^4}{32} = \text{moment d'inertie}$$

$d = 2r = 5 \text{ cm.}$

Compte tenu des caractéristiques de l'appareil, on a
 $\sigma \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = 0,815 \text{ (cm}^{-2}\text{)} \cdot P \text{ (kg).}$

ANGLE DE ROTATION

$$\Delta\theta = \frac{M \cdot l}{G \cdot I}$$

avec $l = 15,6 \text{ cm}$ (distance entre les 2 tiges s'appuyant sur les comparateurs C_1 et C_2).

G : module d'élasticité transversal

$$\Delta\theta \text{ est encore égal à : } \frac{C_2 - C_1}{l'}$$

avec :

C_2 : déformation lue au comparateur C_2 le plus proche du palier mobile

C_1 : déformation lue au comparateur C_1 le plus proche du mandrin

l' : 20 cm par construction.

Compte tenu de ces caractéristiques et avec C_1, C_2 exprimées en microns on a

$$\Delta\theta \text{ (radian)} = 5 \cdot 10^{-6} (C_2 - C_1).$$

Les résultats sont exprimés en 10^{-6} radian (la mesure $C_2 - C_1$ représente en réalité la tangente de l'angle $\Delta\theta$ et non la mesure de l'arc. Etant donné les variations très faibles d'angle, on a calculé que dans les cas les plus défavorables, l'erreur commise restait inférieure à 10^{-7} radian, c'est-à-dire bien inférieure à la dispersion propre des essais).

On peut également en déduire le module d'élasticité transversal puisque $\frac{M \cdot l}{G \cdot I} = \frac{C_2 - C_1}{l'}$; on trouverait :

$$G \text{ kgf/cm}^2 = 100 \text{ (cm}^{-1}\text{)} \frac{P \text{ (kg)}}{(C_2 - C_1) \text{ cm}}$$

Rappelons de plus que

$$G = \frac{m}{2(m+1)} \cdot E \quad \text{avec } m = \frac{1}{\nu}$$

ν étant le coefficient de POISSON

m varie de 6 à 10 pour le béton.

E : module d'élasticité longitudinal.

EXEMPLE

Pour une charge $P = 15 \text{ kg}$ on lit au comparateur C_2 : 180 microns ; au comparateur C_1 : 40 microns. On en déduit :
la contrainte de torsion $\sigma = 0,815 \times 15 \approx 12,2 \text{ kgf/cm}^2$
la déformation instantanée

$$\Delta\theta = 5 \cdot 10^{-6} (180 - 40) = 700 \cdot 10^{-8} \text{ radian}$$

le module d'élasticité transversal

$$G = \frac{100 \cdot 15}{(180 - 40) \times 10^{-4}} \approx 107\,000 \text{ kgf/cm}^2$$

2.6. APPAREILS D'EMPREINTE

Deux types d'appareils ont été construits au CERILH.

2.61. 1^{er} type - Appareil d'empreinte sous charge

2.611. Description

Le schéma est donné sur la figure 2-25 et la réalisation sur la figure 2-26. L'appareil permet la mesure de l'enfoncement et de l'empreinte superficielle sous charge d'une bille d'acier (ou d'une autre forme de plot), dans une éprouvette de pâte pure. Il est constitué :

— d'un bâti rigide muni d'un plateau destiné à recevoir l'éprouvette d'essai (par exemple une éprouvette tronconique de 4 cm de haut, 8 et 9 cm de diamètre à la base) ;

— d'un dispositif d'appui de la charge formant empreinte. Ce dispositif est fixé sur un bras de levier. Les modèles d'empreinte peuvent varier suivant les conditions des essais (bille, prisme à base carrée, cône pyramide...) ;

— d'un système de chargement comprenant un bras de levier (amplification de 5), et un plateau de chargement d'un poids de 5 kg. On peut disposer jusqu'à 60 kg de poids sur l'appareil, ce qui correspond à une force de cisaillement de 300 kg au droit de l'empreinte. L'empreinte habituellement utilisée est une bille d'acier de 10 mm de diamètre : un comparateur au micron permet d'avoir directement l'enfoncement de la bille. Après déchargement, on peut également vérifier l'enfoncement final à l'aide de la mesure du diamètre de l'empreinte. Quatre appareils de ce type ont été construits.

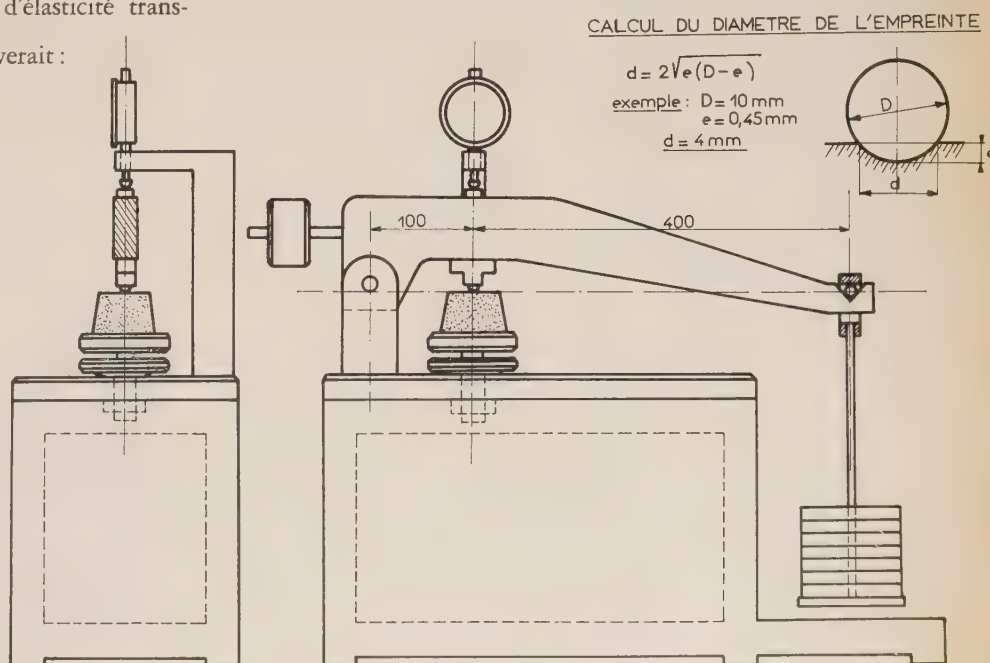


FIG. 2-25

Appareil d'empreinte à la bille.



FIG. 2-26

2.612. Essais préliminaires

INFLUENCE DE LA FORME DE L'EMPREINTE

Les essais ont été effectués sur éprouvettes de pâte pure de CPA 400, conservées préalablement 24 h en armoire humide. Après démoulage, ces éprouvettes — qui avaient une résistance en compression de 530 kgf/cm² — ont été conservées à 50 % d'humidité relative et 20° C et chargées sous 150 kg. Les formes suivantes d'empreintes ont été essayées :

- billes d'acier de 5 et 10 mm de diamètre,
- empreintes pyramidales de 90° et 120° au sommet,
- empreintes carrées de 5 et 10 mm de côté.

Le *tableau 2-III* donne les résultats obtenus jusqu'à 7 jours (date de la fin des essais).

TABLEAU N° 2-III

Empreintes		Enfoncement (en microns)				Déf. (7-1) j
		Instantané	1 j	3 j	7 j	
Billes	5 mm	640	840	900	950	110
	10 mm	340	455	540	570	115
Pyramides	90°	1040	1300	1390	1420	120
	120°	710	915	990	1030	115
Carrés	5 mm	100	155	200	230	75
	10 mm	80	105	140	160	55

LES ENFONCEMENTS SE STABILISENT APRÈS 3 HEURES ENVIRON ET PROGRESSENT ENSUITE A PEU PRÈS COMME LE LOG. DU TEMPS. Il est remarquable que les différentes courbes obtenues soient parallèles entre 1 et 7 jours (sauf pour les 2 empreintes carrées). Compte tenu de ces résultats et des facilités de montage des empreintes, nous avons choisi la bille de 10 mm de diamètre. Les différences d'enfoncement observées suivant les formes d'empreintes sont difficiles à expliquer. En effet, il s'agit d'un essai d'empreinte ou de poinçonnement, qui est destructif en surface

(la matière est refoflée). L'empreinte est donc un peu différente de celle que l'on obtiendrait avec des métaux (où il se forme un rebord de matière autour de l'empreinte) mais cependant proche de celle que l'on aurait avec les roches.

INFLUENCE DU TAUX DE CHARGEMENT

Sur les mêmes éprouvettes de pâte pure nous avons fait varier la charge appliquée avec des billes de 10 mm de diamètre. Le *tableau 2-IV* donne les valeurs obtenues jusqu'à 7 jours pour des charges de 50, 150 et 300 kg.

TABLEAU N° 2-IV

Charges appliquées	Enfoncement (en microns)			
	Instant.	1 j	3 j	7 j
50	100	190	220	240
150	340	520	540	570
300	600	860	890	940

On constate qu'à 7 jours les enfoncements ne sont pas proportionnels à la charge appliquée ce qui explique par le fait qu'en s'enfonçant la bille présente une surface de plus en plus grande. Pour les essais classiques, on a adopté une charge de 150 kg qui correspond à la moitié de la charge maximale que peut supporter l'appareil.

2.62. 2° type - Appareil d'empreinte à deux plots

2.621. Description

Il s'agissait d'essayer de reproduire ce qui se passe dans le béton où un granulat est sollicité en triple étreinte par de la pâte pure qui l'entoure. Le principe de l'appareil consiste à mesurer le rapprochement dans le temps de deux plots soumis à une charge constante et noyés dans une pâte pure de ciment. L'appareil utilisé est analogue au précédent en ce qui concerne le bâti. L'éprouvette prismatique de pâte pure de 4 cm de haut a une base de 8 × 8 cm. Des moules spéciaux en plastique ont été fabriqués afin de confectionner ces éprouvettes par groupe de trois (*figure 2-27*). Ils comprennent des alvéoles pour recevoir des plots en acier de 10 mm de diamètre, terminés par un embout hémisphérique (un jeu très léger existe entre la pâte pure durcie et les plots). La longueur des plots, fixés préalablement dans les moules, détermine l'épaisseur de la pâte à solliciter. On a pris en général une distance initiale entre plots de

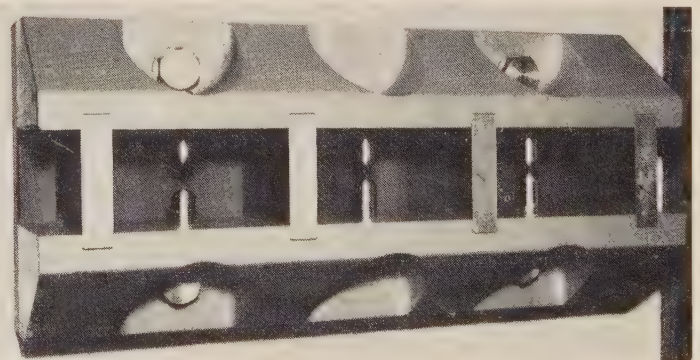


FIG. 2-27

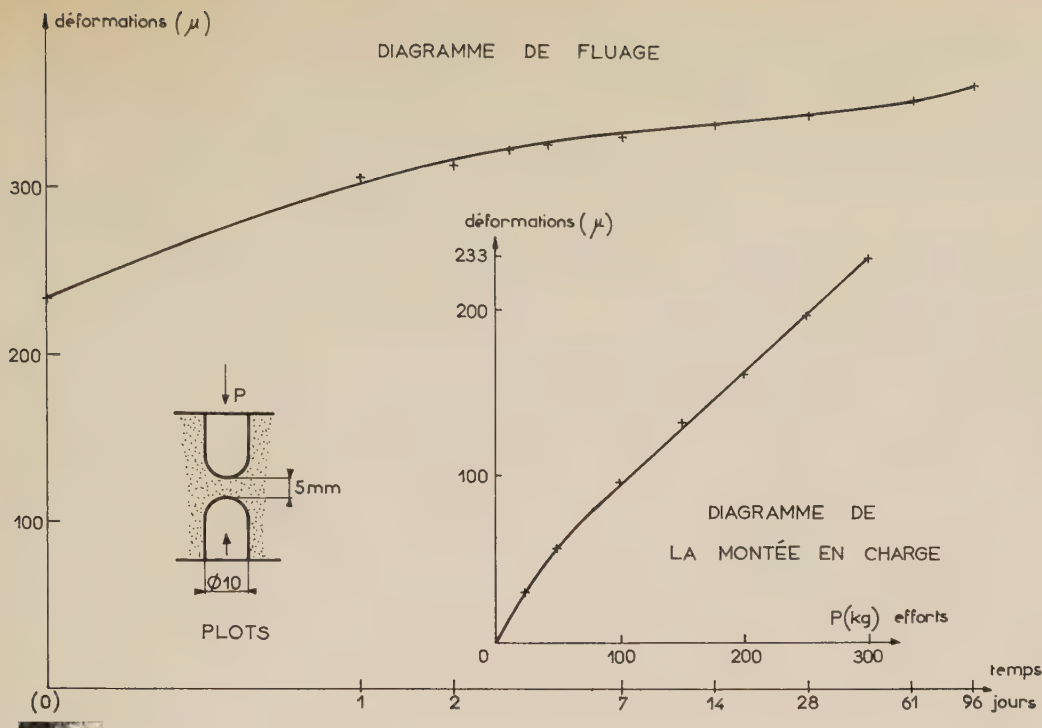


FIG. 2-28

Essai d'empreinte à 2 plots.
Pâte pure de CPAL 325
âgée de 4 jours.

5 mm (sauf pour étudier l'influence de ce paramètre). Ces plots présentent à leur extrémité une cavité conique afin de recevoir la charge appliquée par l'intermédiaire de billes d'acier de 10 mm de diamètre formant rotule de chargement (cette rotule est fixée directement sur le bras de levier).

constitue pas un paramètre important. On peut donc effectuer des essais en conservant la distance de 5 mm (tableau 2-V).

2.622. Essais préliminaires

Une pâte pure de consistance normale âgée de 4 jours (CPAL 325) a été essayée sous une charge de 300 kg. Les résultats obtenus sont reproduits sur la figure 2-28.

Le rapprochement initial des plots augmente linéairement avec la charge appliquée jusqu'à 300 kg. Elle est alors de 0,23 mm. Le rapprochement sous charge évolue ensuite lentement : 0,13 mm en 3 mois. Ces essais ont été complétés par l'étude de l'influence de la distance entre plots qui a été prise égale à 2,5 et 10 mm. Les résultats obtenus sur une pâte de CPA 400 âgée de 24 heures montrent que cette distance ne

Tableau n° 2-V

Ciment CPA 400 — Pâte pure (E/C = 24,6 %)
Conservation préalable : 24 h à 20° C

Distance entre plots	Rapprochement des plots (en microns)					
	Instant.	2 j	7 j	21 j	35 j	182 j
2 mm	180	215	220	230	235	250
5 mm	175	210	215	230	235	250
10 mm	150	180	190	200	205	215

CHAPITRE 3

RECHERCHES EFFECTUÉES

3.1. RESULTATS OBTENUS EN COMPRESSION

3.11. Influence du ciment

3.111. Nature du ciment.

Ciments fabriqués en laboratoires à partir de clinkers industriels.

Six clinkers ont été broyés à $3\,000 \pm 100$ cm²/g et additionnés de 5 % de gypse à 5 000 cm²/g (teneur en SO₃ : 40,3 %). Les caractéristiques chimiques de ces clinkers sont données dans le *tableau 3-I*.

Les six ciments ainsi fabriqués avaient des temps de prise très voisins à l'exception de B 113 :

— début de prise compris entre 3 h 40 et 4 h 15 (B 113 : 6 h 50),

— fin de prise compris entre 6 h et 7 h 15 (B 113 de l'ordre de 10 h).

Des éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm en béton 0/15 mm, dosé à 350 kg de ciment par m³, ont été confectionnées avec ces ciments. Après conservation préalable de 28 jours dans l'eau à 20° C elles ont été mises à l'air et chargées sous des pressions de 0 (témoin) 50 et 150 kgf/cm².

Les résultats apparaissent sur la *figure 3-1* (pour la contrainte de 50 kgf/cm²) et sur la *figure 3-2* (pour la contrainte de 150 kgf/cm²) et jusqu'à 1 an.

On voit que les retraits libres, mis à part celui du "B 112", sont très proches les uns des autres. Par contre LES FLUAGES SONT TRÈS DIFFÉRENTS D'UN CIMENT A L'AUTRE : on retrouve d'ailleurs le ciment B 112 qui donne le maximum de fluage. Ce ciment se caractérise par le fait qu'il contient une assez forte teneur en alcalis et en C₃A (le ciment qui donne le moins de fluage a par contre peu d'alcalis, une faible teneur en C₃A et une forte teneur en C₃S, c'est une constatation qu'on ne peut pas généraliser sans précaution), et aussi la plus faible teneur en C₃S.

LE FLUAGE AUGMENTE A PEU PRÈS COMME LE LOGARITHME DU TEMPS. La formule la plus souvent mentionnée pour rendre compte du fluage visco-élastique est

$$\varepsilon(t) = k (1 - e^{-at})$$

Nous avons essayé sans succès d'appliquer cette formule à nos résultats. A moins d'utiliser une formule très compliquée on a trouvé jusqu'à présent que c'était encore le logarithme du temps en jours — au moins entre 1 j et 2 ans — qui donnait la meilleure approximation de la progression du fluage dans le temps.

Les déformations à 180 jours ont été regroupées sur un *tableau 3-II*. On voit que le fluage proprement dit, c'est-à-dire : déformation totale — (déformation instantanée + retrait libre) varie de 160 à 300 μ/m pour une contrainte de 50 kgf/cm² et de 370 à 950 μ/m pour une contrainte de 150 kgf/cm².

LE FLUAGE SEUL SOUS 150 kgf/cm² EST ENVIRON 3 FOIS PLUS ÉLEVÉ QUE LE FLUAGE SOUS 50 kgf/cm². On a pu faire, à partir de ce *tableau 3-II* des rapprochements intéressants :

1) On a rapporté sur le *tableau 3-III* les retraits libres :

— en mortier 1/3 (éprouvettes de 4 × 4 × 16 cm mises dans l'air après démoulage),

TABLEAU 3-I

Composition minéralogique des ciments étudiés

Analyses		Références des clinkers					
		B 113	A 911	A 910	A 912	A 909	B 112
Minéralogiques	SO ₄ Ca	0,8	1,5	1,1	1,5	0	0,4
	C ₄ AF	5,9	7,0	8,9	7,5	5,1	9,8
	C ₃ A	5,1	11,5	9,4	10,3	9,0	15,4
	C ₃ S	66,9	55,7	54,6	50,7	59,4	45,3
	C ₂ S	18,6	21,0	21,9	25,4	24,2	24,1
Déterminations particulières	CaO libre	0,5	1,5	0,7	0,3	0,8	1,6
	Alcalis Na ₂ O + K ₂ O	0,3	0,3	0,8	1,2	0,1	1,4

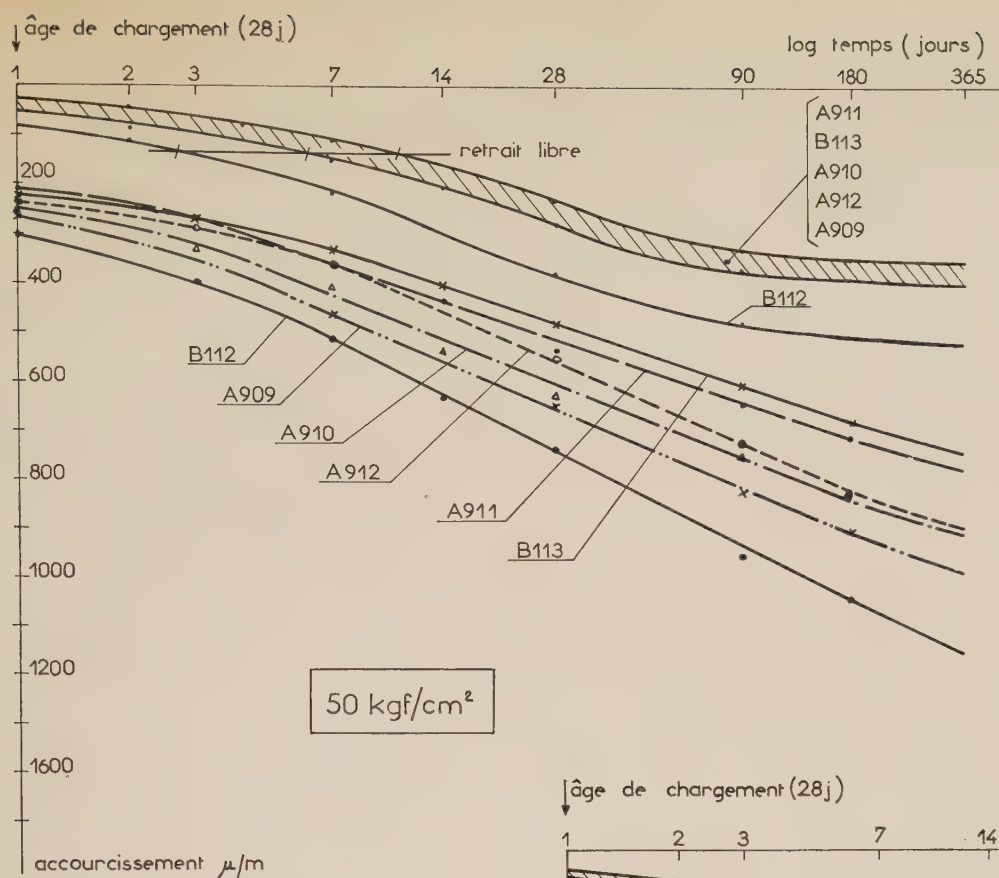


FIG. 3-1

Fluage comparé de différents ciments.
Béton 0/15 mm - 350 kg de ciment/m³.
Eprouvettes de 7 × 7 × 28 cm.

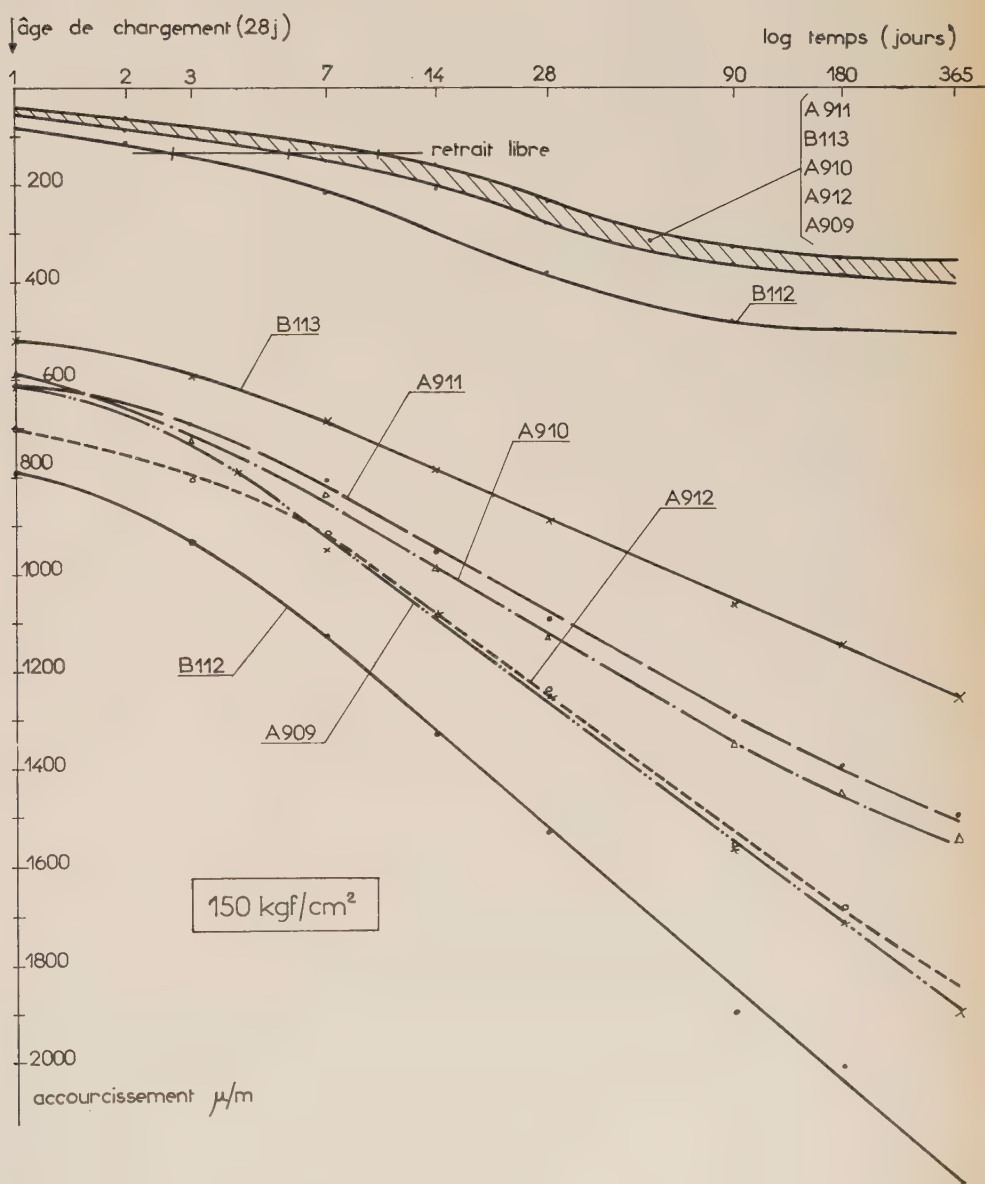


FIG. 3-2

Fluage comparé de différents ciments.
Béton 0/15 mm - 350 kg de ciment/m³.
Eprouvettes de 7 × 7 × 28 cm.

TABLEAU 3-II

Déformations à 180 jours (μ/m)

Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm — Béton 0/15 mm, 350 kg/m^3
 Conservation initiale : 28 jours eau à 20°C — Chargement à 28 jours
 Conservation dans l'air à 50 % H.R. — Taux de chargement : 50 et 150 kgf/cm^2

Références des ciments	Retrait libre (μ/m) (1)	50 kgf/cm^2				150 kgf/cm^2			
		Mesures		Calculs		Mesures		Calculs	
		Déf. Inst. à 28 j (2)	Déf. totale à 180 j (3)	Fluage + Retrait (4)=(3)-(2)	Fluage (4)-(1)	Déf. Inst. à 28 j	Déf. Totale à 180 j	Fluage + Retrait	Fluage
B 113	360	160	680	520	160	420	1150	730	370
A 911	350	150	700	550	200	475	1400	925	575
A 910	370	180	830	650	280	480	1450	970	600
A 912	370	170	810	640	270	520	1690	1170	800
A 909	385	200	890	690	305	510	1700	1190	805
B 112	500	220	1050	830	330	560	2010	1450	950

— en béton (éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm mises dans l'air après une conservation initiale de 28 jours dans l'eau),

— le fluage sous 150 kgf/cm^2 .

On retrouve le même classement de retrait libre sur mortier ou sur béton, malgré les conditions différentes de nature d'éprouvettes de dimensions et de conservation (les retraits libres sur béton sont ainsi plus lents que sur mortier, ce qui est logique). Les ciments se classent dans le même ordre en ce qui concerne le fluage : cela est illustré par la figure 3-3 (courbes à 6 mois et à 1 an).

2) On a reporté sur un autre tableau 3-IV les résistances mécaniques obtenues sur ces ciments après 28 jours de conser-

TABLEAU 3-III
Corrélation retrait/fluage
180 jours
(μ/m)

Ciments	Retrait libre		Fluage sur béton (eau 28 j puis air) (150 kgf/cm^2)	
	Mortier 1/3 (air)	Béton (eau 28 j, puis air)	Déformation totale	Fluage seul
B 113	765	360	1150	370
A 911	825	350	1410	575
A 910	1000	370	1460	600
A 912	1045	370	1690	800
A 909	1220	385	1700	805
B 112	1345	500	2010	950

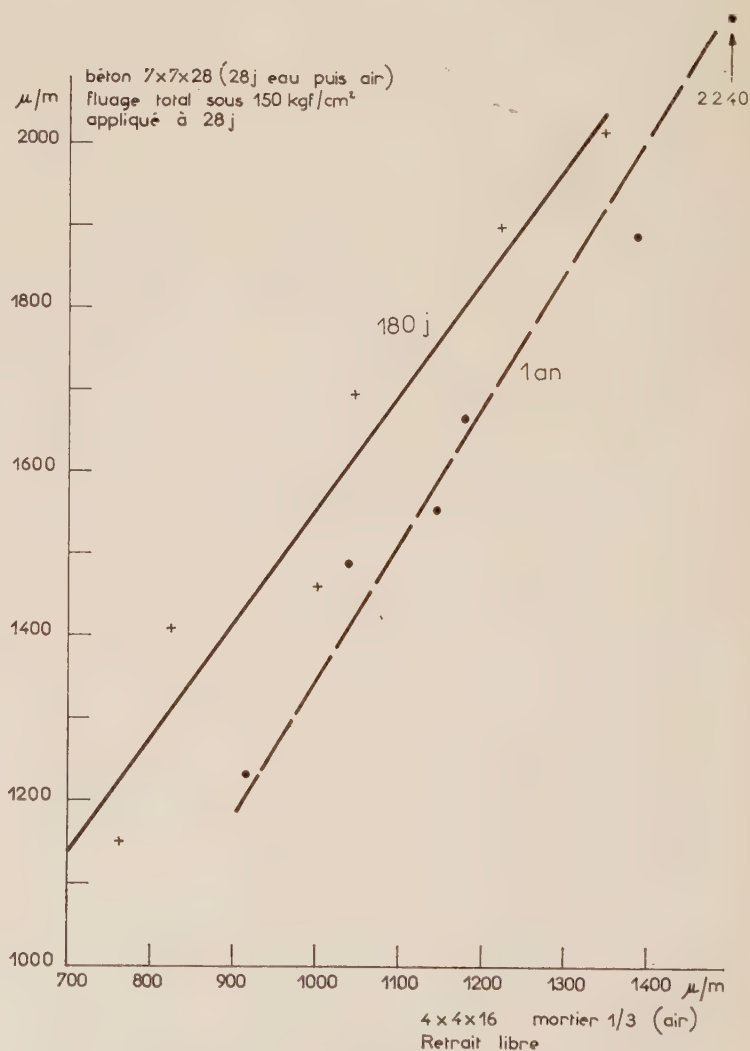


FIG. 3-3

Corrélation retrait libre/fluage à 180 jours et 1 an.

TABLEAU 3-IV

Relation déformations/résistances mécaniques

Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm — Béton 0/15 mm, 350 kg/m³

Conservation eau 20° C : 28 jours, puis air 20° C

Mise en charge à 28 jours : 150 kgf/cm²

Référence des ciments	Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations (μ /m)			Retrait libre (μ /m)	Fluage-retrait libre
	28 j	28 + 60 j	28 j (1)	28 j + 60 j (2)	Fluage (60 j) (2) — (1)	28 j + 60 j	28 j + 60 j
B 113	695	920	420	1010	590	310	280
A 911	675	760	475	1220	745	310	435
A 910	690	760	480	1270	790	330	460
A 912	675	705	520	1470	950	320	630
A 909	600	710	510	1470	960	325	635
B 112	558	635	560	1790	1230	440	790

vation dans l'eau ou après à nouveau 60 jours de conservation dans l'air.

On a comparé ces valeurs de résistance au fluage aux mêmes âges. On voit alors (figure 3-4) qu'il existe une TRÈS BONNE CORRÉLATION ENTRE CES RÉSISTANCES ET LES DÉFORMATIONS (déformation totale, fluage + retrait et fluage seul).

On a ensuite calculé les coefficients de corrélation linéaire de PEARSON entre :

— le retrait libre sur mortier et les déformations totales à 180 jours (coefficient $r = 0,946$),

— les résistances mécaniques et le fluage seul à 28 + 60 jours (coefficient $r = 0,95$) (tableau 3-V).

Des relations analogues seraient obtenues à 1 an mais les résistances mécaniques des éprouvettes sont alors assez proches, sauf pour les deux ciments extrêmes (B 113 qui aurait 930 kgf/cm² et B 112 qui aurait 690 kgf/cm²) et ces résistances augmentent très peu dans le temps.

REMARQUE

On a pu préciser la relation existant entre le fluage $\varepsilon(t)$ et les résistances mécaniques R , relation qui serait de la forme $\varepsilon(t) = \frac{K}{R_n}$, K et n étant des paramètres variant avec la nature du ciment et les conditions opératoires. On trouverait en prenant le 2^e exemple du tableau 3-V, $n = 0,52$, $K = 2,27$

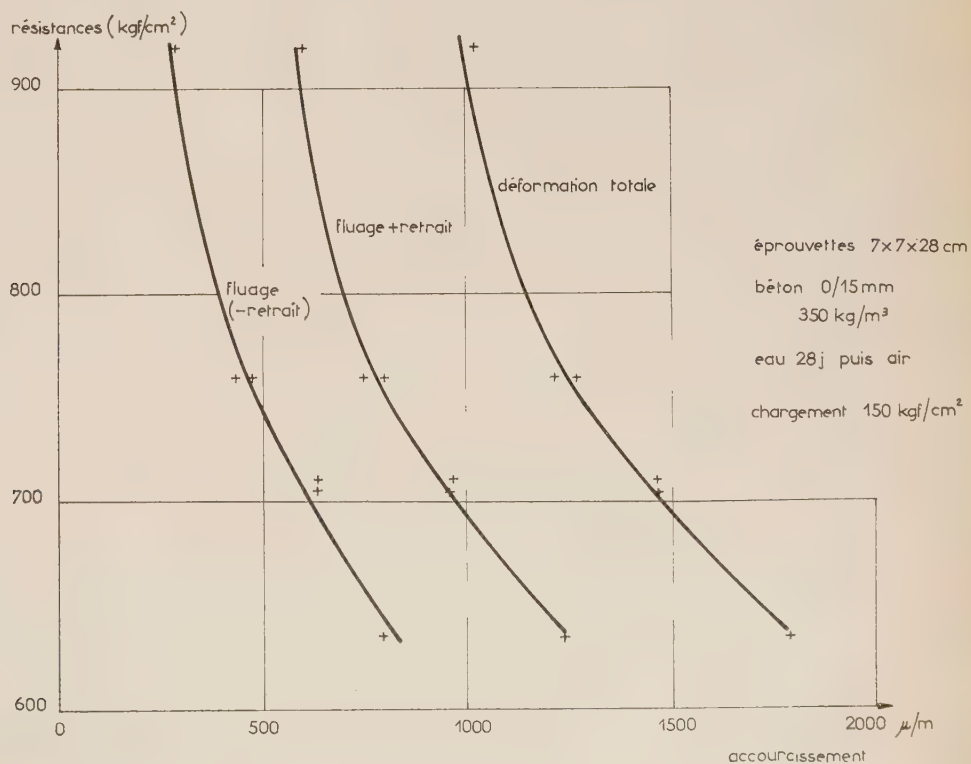


FIG. 3-4

Corrélation résistance/accourcissement
(âge de chargement 28 jours).
Essais à 28 + 60 jours.

TABLEAU 3-V
Calcul des corrélations

1^{er} exemple
180 jours

Ciments	Mortier 1/3 retrait libre	Déformation totale sur béton 150 kgf/cm ²
B 113	765	1150
A 911	825	1410
A 910	1000	1460
A 912	1045	1690
A 909	1220	1700
B 112	1345	2010
X $r = 0,946$ droite de régression $Y = 1,25 X + 271$		Y

2^e exemple
28 jours + 60 jours

Ciments	Résistances en compression (kgf/cm ²)	Fluage seul
B 113	920	280
A 911	760	435
A 910	760	460
A 912	710	635
A 909	705	630
B 112	635	790
X $r = 0,951$ droite de régression $Y = 1885 - 1,8 X$		Y

r = coefficient de corrélation linéaire de PEARSON ; si $0,90 < r < 1$ la corrélation est très forte (c'est le cas ici).

soit

$$\varepsilon(60 \text{ j}) = \frac{2,270}{R^{0,52}}$$

Ce qui est remarquable c'est que cette relation semble être générale.

3.112. Finesse du ciment.

Deux séries d'essais assez différents ont été effectués à 1 an d'intervalle.

1^{re} série.

Un clinker de cimenterie a été broyé à 5 finesses de 1 500 à 4 000 cm²/g (C₃S : 51 %, C₂S : 25 %, C₃A : 10 %, C₄AF : 8 %, CaO libre : 0,30 %, donc ciment stable). Ces poudres ont été additionnées de 5 % de gypse à 5 000 cm²/g puis

parfaitement homogénéisées. On a ainsi confectionné 5 ciments ayant respectivement des finesses Blaine de 1 530, 2 650, 2 990, 3 650 et 4 010 cm²/g. Avec ces ciments des éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm en béton 0/15 mm dosé à 350 kg ont été faites. La quantité d'eau a été déterminée de façon à opérer A PLASTICITÉ ÉGALE correspondant à un slump de 3 ± 1 cm.

Les éprouvettes ont été conservées préalablement pendant 28 JOURS dans l'eau potable à 20° C puis placées dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C et chargées à 0 (éprouvettes de retrait témoin), 50 et 150 kgf/cm². Les résistances mécaniques, les retraits et les fluages ont été régulièrement mesurés.

Après 180 jours les éprouvettes chargées à 50 kgf/cm² ont été déchargées afin de libérer des bâtis de fluage et de poursuivre l'étude sur l'influence d'autres paramètres.

TABLEAU 3-VI
Fluage en compression
(sous 150 kgf/cm²) — Influence de la finesse des ciments (1^{re} étude)

Finesse ciment (cm ² /g)	Rapports E/C	Résistances en compression (kgf/cm ²)			Déformations totales (μ/m)			
		28 j (chargem.)	28 j + 28 j	28 j + 337 j	Inst.	Après 28 j	Après 337 j	Après 600 j
1530	0,39	480	630	640	550	1280	1850	1930
2650	0,40	600	700	760	440	1000	1480	1530
2990	0,415	670	720	790	490	1150	1670	1740
3650	0,43	630	710	770	510	1120	1630	1690
4010	0,48	600	680	740	510	1290	1940	2010

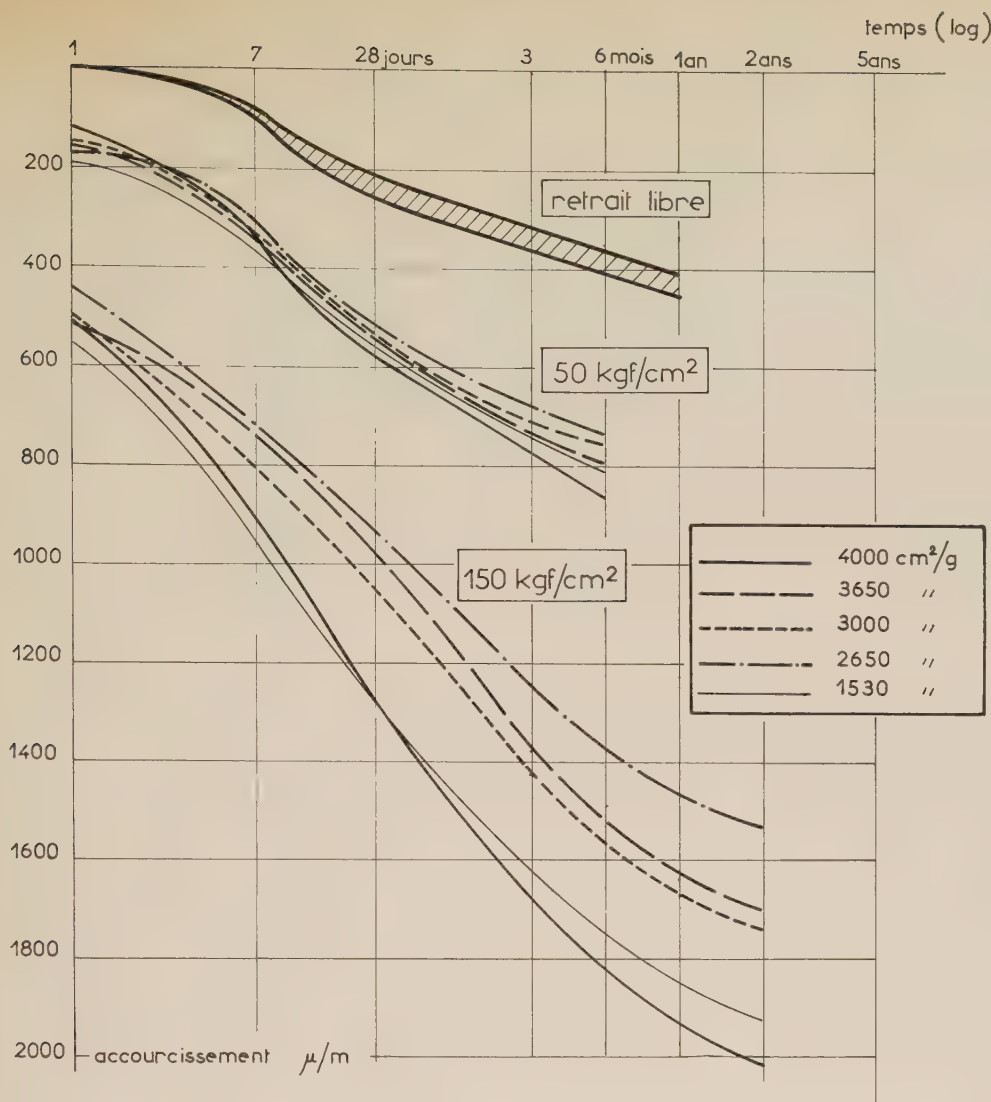


FIG. 3-5

Influence de la finesse sur le fluage.
(1^{re} étude)

Le tableau 3-VI résume les principaux résultats obtenus. On voit d'abord qu'à 28 jours les résistances des ciments ayant des surfaces Blaine comprises entre 2650 et 4010 cm^2/g sont voisines. Cela s'explique par le fait qu'à rapport E/C égal, la résistance est d'autant plus élevée que le ciment est plus fin (cela est surtout vrai aux premiers âges), et qu'à finesse égale de mouture, la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C est plus faible. Dans nos essais, les ciments les plus fins ayant demandé le plus d'eau de gâchage, l'un compense à peu près l'autre — à la dispersion près des essais. On voit ensuite (figure 3-5) que le fluage total augmente en fonction du log. du temps et qu'il semble bien y avoir un FLUAGE MINIMUM pour une zone de finesse comprise ici entre 2650 et 3650 cm^2/g (ce qui correspond, par chance, aux finesses habituelles des ciments). En première approximation, la déformation totale à

660 jours est égale à 3 à 4 fois la déformation instantanée et le fluage est doublé en passant de 28 j à 660 j. On remarque également à 180 jours qu'en soustrayant la valeur du retrait libre du fluage, le FLUAGE SOUS 150 kgf/cm^2 EST ENVIRON 3 FOIS PLUS ÉLEVÉ QUE LE FLUAGE SOUS 50 kgf/cm^2 , comme l'indique le tableau 3-VII.

On constate ainsi qu'à 180 jours :

- la valeur du retrait libre correspond à un fluage qui aurait lieu sous une charge comprise entre 40 et 50 kgf/cm^2 ,
- le fluage sous 150 kgf/cm^2 est environ 3 fois plus élevé que le retrait libre.

Les éprouvettes sous 50 kgf/cm^2 déchargées à 180 jours regonflent en quelques minutes d'une valeur proche de celle obtenue en déformation instantanée, ensuite elles se stabilisent et ne prennent pratiquement plus d'accourcissement appréciable dans le temps. Pour expliquer cela on pourrait faire l'hypothèse suivante : la courbe de retour doit exister (gonflement relatif lent après déchargement) mais comme les éprouvettes continuent à prendre du retrait (accourcissement dans le temps) les deux phénomènes se superposent et se compensent à peu près.

2^e série.

Un autre clinker de cimenterie a été broyé et additionné de gypse comme dans le cas de la 1^{re} série, mais les 4 finesses retenues ont été 2040, 2950, 4040 et 5070 cm^2/g Blaine. Les essais ont été effectués dans les mêmes conditions que précédemment, sauf en ce qui concerne le délai de durcissement. Les éprouvettes ont en effet été chargées à 150 kgf/cm^2 , 7 JOURS

TABLEAU 3-VII
Fluage seul à 180 jours
(μ/m)

Pression d'essai (bar)	Finesse (cm^2/g)				
	4010	3650	2990	2650	1530
50	450	415	395	385	440
150	1365	1110	1160	1000	1345

TABLEAU 3-VIII

Fluage en compression - Influence de la finesse des ciments (2^e étude)

Finesse du ciment (cm ² · g)	Plasticité égale		Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations (μ/m)		
	Eau (l)	E/C	(mise en charge) 7 j	7 j + 21 j	Inst.	Après 7 j + 21 j	Fluage à 21 j (+ retrait)
2040	148	0,42	315	430	640	1580	940
2950	156	0,445	490	670	440	1070	630
4040	162	0,46	620	760	330	860	530
5070	169	0,48	620	720	340	930	590

FIG. 3-6

Corrélation résistances/accourcissement.
Influence de la finesse du ciment.
(2^e étude)

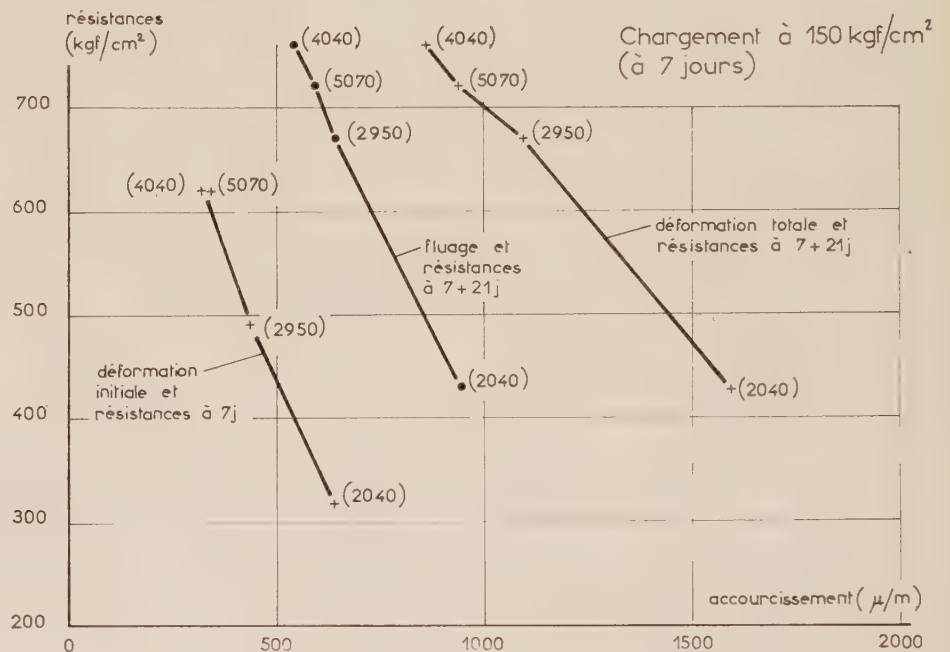
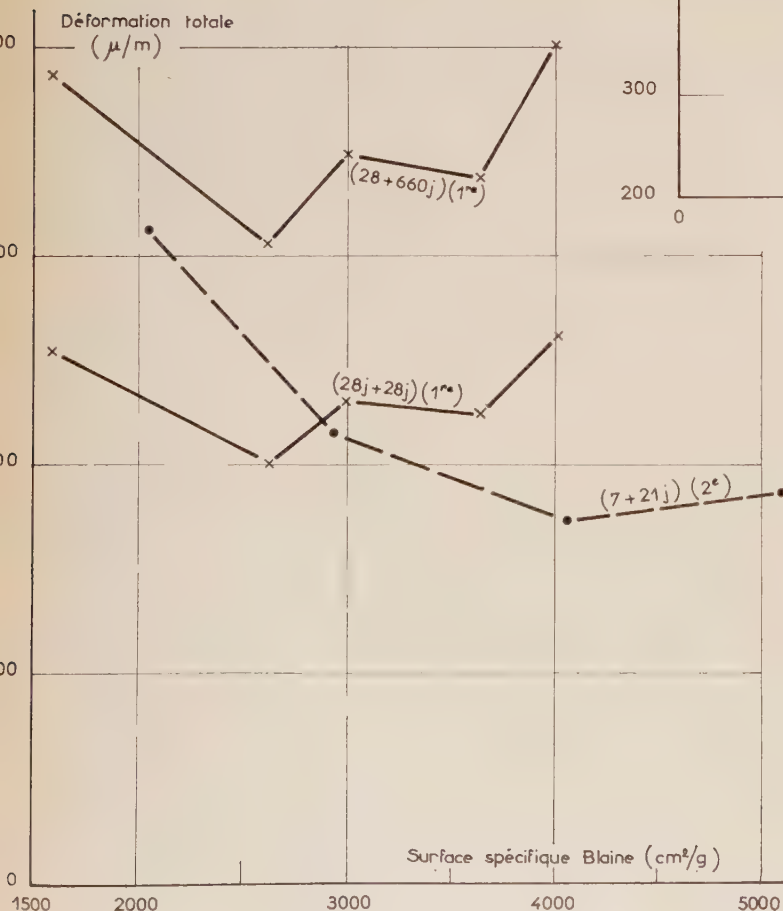


FIG. 3-7

Déformations totales en fonction de la finesse.
(Études nos 1 et 2 sur la finesse)



seulement après leur confection. Les résultats déjà obtenus sont donnés sur le *tableau 3-VIII* et la *figure 3-6*. Les constatations suivantes peuvent être faites :

— les résistances à 7 jours sont plus différenciées qu'à 28 jours : les déformations instantanées sont alors d'autant plus fortes que les résistances sont plus faibles,

— la corrélation est également très bonne entre la déformation totale ou le fluage après 28 jours et les résistances au même âge,

— on retrouve que pour une certaine zone de finesse — qui serait ici comprise entre 2 950 et 4 040 cm²/g, le fluage est minimum.

Ces résultats complètent donc les précédents. Nous avons regroupé sur une même figure (3-7) les résultats essentiels de ces deux séries d'essais. Cette légère tendance à un fluage minimum, pour une certaine zone de finesse (qui doit varier avec la nature des ciments et l'âge de mise en charge), s'explique de la façon suivante.

Les ciments grossiers qui ont des résistances mécaniques plus faibles se déforment plus, surtout aux premiers âges. A

TABEAU 3-IX
Comparaison sur pâte pure et sur béton (ciment A 909)

Conservation après chargement (20° C)	Matériaux	Résistances mécaniques (kgf/cm ²)		Retrait libre (témoïn) (μ/m)		Déformations (mesures) (μ/m)			Calculs (μ/m) 1 an	
		1 mois	1 an	1 mois	1 an	Inst.	1 mois	1 an	Fluage + retrait	Fluage — retrait
Air (50 %)	Pâte pure	900	1000	500	1300	640	2210	3830	3190	1890
	Béton	600	720	275	400	510	1280	1890	1380	980
Eau	Pâte pure					640	1150	1580	940	
	Béton					510	680	850	340	

l'autre extrémité, les ciments très fins qui demandent plus d'eau de gâchage présentent des résistances mécaniques qui plafonnent très vite. Ils ont de plus un retrait hydraulique un peu plus élevé. On comprend alors qu'après un temps de chargement assez long, ils puissent avoir une déformation totale (y compris le retrait hydraulique qui s'y trouve intégré), un peu plus forte.

3.113. Dosage en ciment.

Des essais limités ont été faits sur éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm en pâte pure et en béton 0/15 mm avec un CPA 325 (A 909). La mise en charge sous 150 kgf/cm² a été effectuée après 28 jours de conservation préalable dans l'eau, puis les éprouvettes ont été replacées dans l'eau ou dans l'air (deux milieux de conservation). Les résultats obtenus figurent au *tableau 3-IX*.

Les constatations suivantes peuvent être faites :

Dans l'eau :

La déformation instantanée est plus forte sur la pâte pure que sur le béton (malgré les résistances mécaniques plus élevées de la pâte pure). Le fluage seul à 1 an est PRESQUE 3 FOIS plus élevé sur pâte pure que sur béton. Cela s'expliquerait par le fait que c'est surtout la pâte qui flue : dans le béton utilisé il y avait environ 30 % en volume de pâte pure. Les granulats au départ, lors de la mise en charge, se rapprochent très rapidement grâce aux vides existant dans la structure : il se produit une sorte de tassement (sans doute en très grande partie irréversible), ensuite les granulats en place se déformeraient beaucoup moins que la pâte pure car leur module d'élasticité est plus élevé.

Dans l'air :

Par rapport à la conservation dans l'eau, le fluage SEUL (en ôtant la valeur du retrait hydraulique) est 2 fois plus élevé pour la pâte pure (1 890 μ/m comparé à 940 μ/m) et 2 fois 1/2 plus élevé pour le béton (980 μ/m comparé à 340 μ/m). Le phénomène se complique ici du fait du retrait hydraulique qui est différent sur pâte pure et sur béton.

A LA VUE DE CES RÉSULTATS, ON PEUT PRÉVOIR QU'IL EXISTE UN CERTAIN DOSAGE EN CIMENT, DONC EN PÂTE PURE, DONNANT LE FLUAGE MINIMUM. En effet, le fluage est un phénomène complexe tenant compte d'un certain nombre de facteurs variant dans un sens favorable ou défavorable :

— le fluage intrinsèque augmente avec le volume de pâte

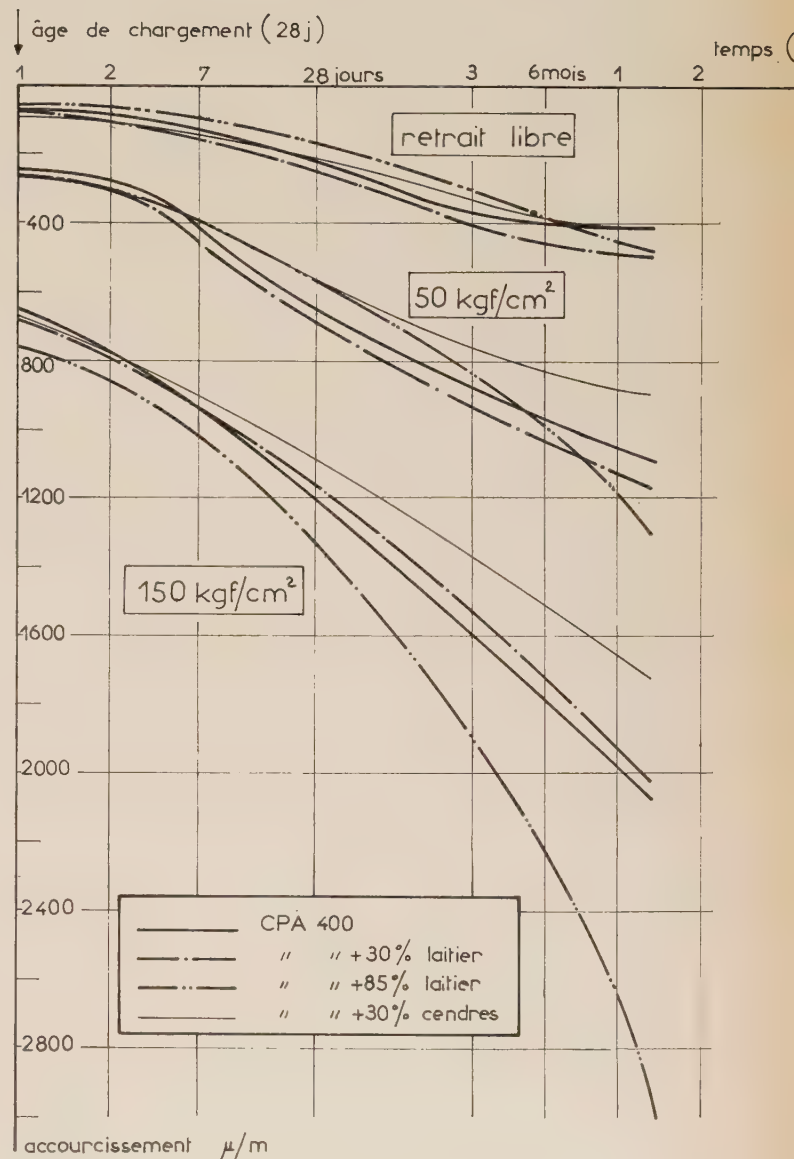


FIG. 3-8

Fluage comparé. Influence de l'ajout de constituants secondaires.
Éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm.
Béton 0/15 mm - 350 kg de ciment/m³.

TABLEAU 3-X

Relation - déformations/résistances mécaniques

Eprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm — Béton 0/15 mm, 350 kg/m³ — Mise en charge à 28 jours : 150 kgf/cm²

Référence des ciments	Surface spécifique (cm ² /g)	Teneur en eau (l/m ³)	Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations μ /m			Retrait libre (μ /m)	Fluage- retrait libre (μ /m)
			28 j	28 j + 60 j	28 j (1)	28 j + 60 j (2)	Fluage à 60 j (2) — (1)	28 j + 60 j	28 j + 60 j
CPA 400 (B 216)	3420	180	605	720	500	1495	995	360	635
CPA 400 + 30 % de laitier	3430	173	575	715	530	1410	880	410	470
CPA 400 + 85 % de laitier	3430	165	365	455	685	1650	965	300	665
CPA 400 + 30 % de cendres volantes	3810	160	615	740	520	1285	765	360	405
B 217 (ciment spécial)	2600	160	745	800	490	1070	580	260	320
B 217 (ternaire)	6740	170	180	285	620	2300	1680	370	1310
XEH 30 (B 219)	7110	180	240	325	540	2650	2110	460	1650

(Essais effectués à plasticité égale)

pure (mais on ne peut pas faire un béton sans pâte pure qui aurait des vides et aucune résistance),

— le fluage diminue lorsque les résistances mécaniques augmentent (celles-ci augmentent elles-mêmes en fonction du dosage en pâte pure, mais la progression cesse d'être linéaire au-delà d'un certain dosage),

— le retrait hydraulique augmente en fonction du volume absolu de pâte pure.

3.12. Influence des additions

3.121. Constituants secondaires.

3.1211. Laitier et cendres volantes.

Un CPA 400 du commerce (référence B 216) a été utilisé seul ou additionné de LAITIER ou de CENDRE VOLANTE :

— 30 et 85 % de laitier de l'Est broyé à la même finesse de mouture que le portland et gypsé à 5 % (soit environ 3 % en SO₃),

— 30 % de cendre volante du Nord broyée à une finesse de 4 800 cm²/g environ.

Des éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm en béton 0/15 mm dosé à 350 kg de ciment/m³ ont été confectionnées et conservées préalablement 28 jours dans l'eau à 20° C. Elles ont ensuite été placées dans l'air et chargées sous 0 (témoin) 50 et 150 kgf/cm². Les résistances mécaniques ont été mesurées à 28 jours et 28+60 jours. Le *tableau 3-X* donne les résultats obtenus sous 150 kgf/cm² ainsi que les caractéristiques des ciments et les résistances mécaniques. La progression des différentes cour-

bes de fluage apparaît sur la *figure 3-8*. De cet ensemble de résultats les conclusions suivantes peuvent être données, qui confirment celles d'essais précédents :

— le fluage augmente à peu près comme le logarithme du temps et le fluage seul sous 150 kgf/cm² est environ 3 fois plus élevé que le fluage sous 50 kgf/cm² (mais le plus souvent légèrement moins que 3).

On constate à 540 jours que les fluages du CPA et du mélange avec 30 % de laitier sont analogues. Le fluage du CPA avec 30 % de cendre est un peu inférieur (sans doute à cause des résistances mécaniques plus élevées dans le temps), tandis que le fluage du CPA avec 85 % de laitier est plus élevé (ce qui est logique puisque les résistances mécaniques sont plus faibles). En essayant de comparer les augmentations de fluage dans le temps, on constate qu'elles ne sont pas tout à fait proportionnelles aux charges appliquées. On a cherché à expliquer ce phénomène en considérant que les éprouvettes non chargées étaient en fait soumises à une certaine contrainte provenant du retrait hydraulique après prise. On a même pu chiffrer cette contrainte à l'aide d'un graphique : *figure 3-9*. Dans le cas de nos essais, on voit qu'elle serait comprise entre 25 et 40 kgf/cm². On a bien alors, en prenant par exemple une abscisse négative de — 30 kgf/cm² une proportionnalité acceptable entre les déformations et les charges appliquées calculées qui deviendraient alors respectivement : 30, 80 et 180 kgf/cm².

3.1212. Ciments commerciaux spéciaux.

Trois ciments spéciaux du commerce ont été utilisés et ont été soumis aux mêmes essais que précédemment. Les résultats sont donnés dans le même *tableau 3-X* et sur la *figure 3-10*;

TABLEAU 3-XI

Exploitation des données du tableau 3-X

Référence des ciments	28 j + 60 j		Rapports	
	Résis- tances	Fluage seul	28 j	28 j + 60 j
			$\frac{R}{\text{Déf. Inst.}}$	$\frac{R}{\text{Déf. totale}}$
B 218	800	320	1,67	0,75
CPA 400 + 30 % c.v.	740	405	1,21	0,57
CPA 400 (B 216)	720	635	1,18	0,48
CPA 400 + 30 % laitier	715	470	1,08	0,50
CPA 400 + 85 % laitier	455	665	0,53	0,27
XEH 30 (B 219)	325	1650	0,44	0,12
B 217 (ternaire)	285	1310	0,29	0,12

Ici la relation entre la résistance et le fluage serait

$$\varepsilon(60 \text{ j.}) = \frac{475\,000}{R^{1,5}}$$

le ciment le plus résistant des trois a le plus faible fluage, les deux ciments à faible résistance ont par contre des fluages très importants. Les résultats des essais précédents ont été regroupés et les sept ciments classés dans l'ordre des résistances décrois-

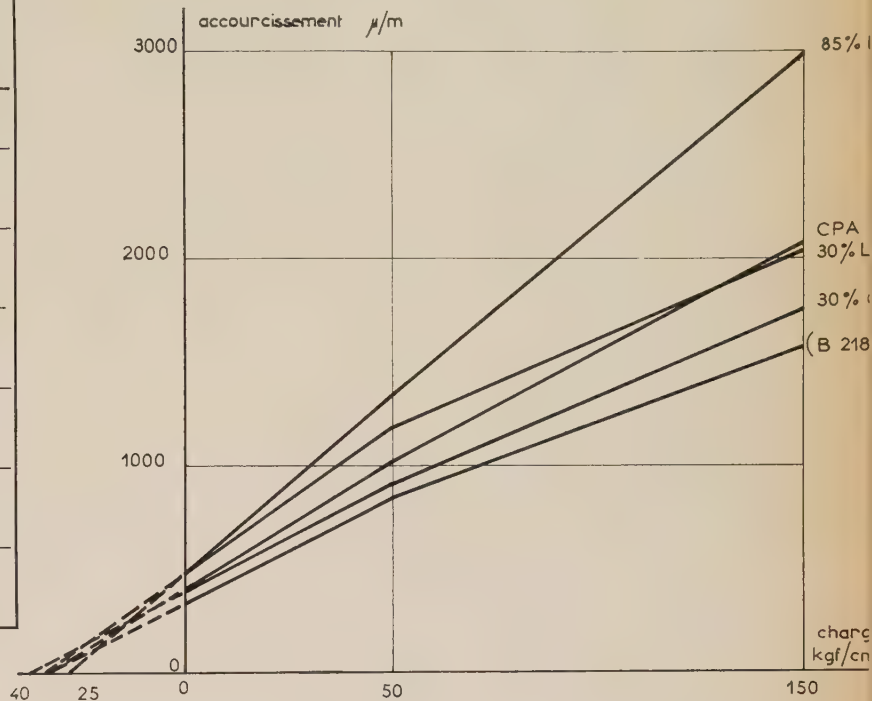


FIG. 3-9

Accourcissement total à 540 j
en fonction de la charge.

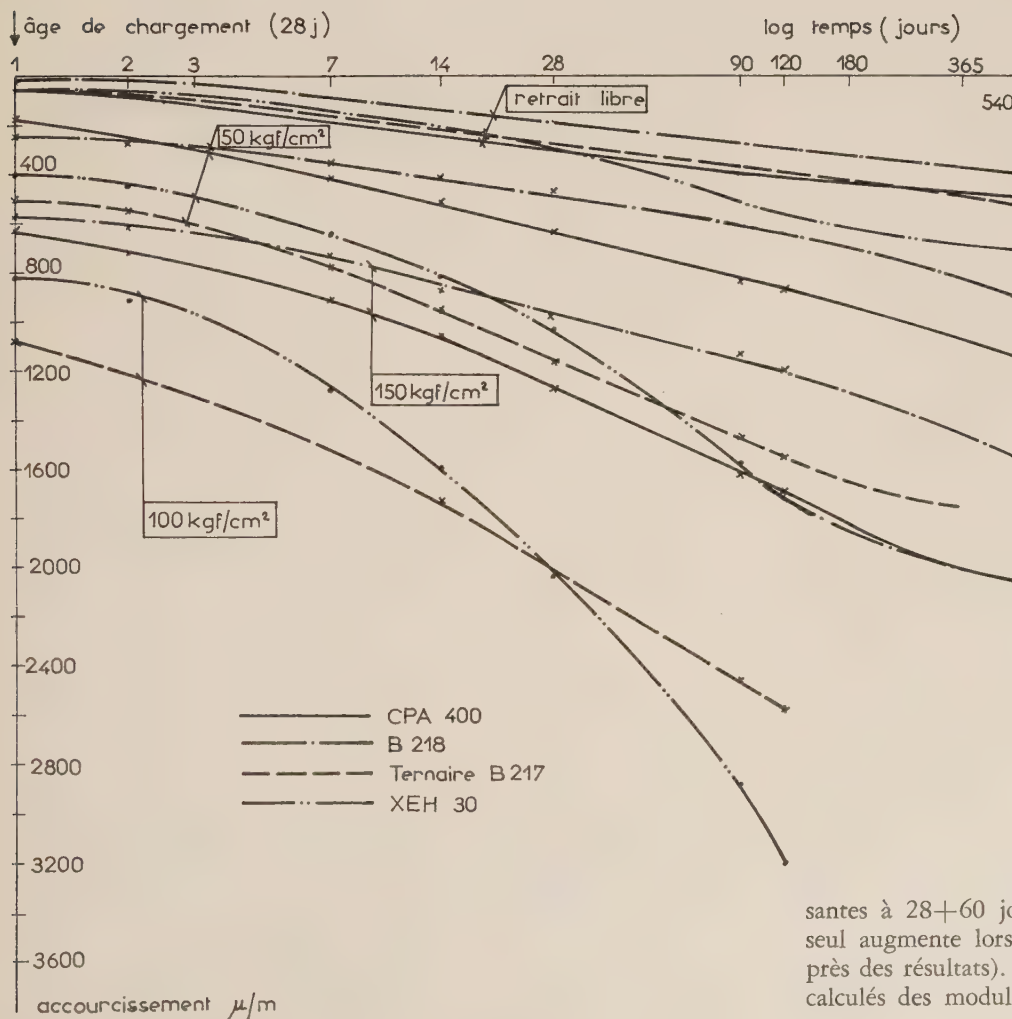


FIG. 3-10

Fluage comparé. Influence de quelques
ciments commerciaux.
Béton 0/15 mm - 350 kg de ciment/m³
Eprouvettes de 7 × 7 × 28 cm.

santes à 28+60 jours, *tableau 3-XI*. Dans l'ensemble, le fluage seul augmente lorsque les résistances diminuent (à la dispersion près des résultats). Sur le même tableau, on a donné les rapports calculés des modules suivants :

TABLEAU 3-XII

Mélanges Ajout de chaux (%)	7 jours		42 jours	
	Déforma- tions (μ/m)	Résistances (kgf/cm^2)	Déforma- tions (μ/m)	Résis- tances (kgf/cm^2)
0 (témoin)	250	600	190	680
25	360	410	210	460
50	740	140	390	190

28 jours. Au-delà, les éprouvettes ont été déchargées afin de pouvoir réutiliser les bâtis.

Les déformations instantanées sous charge après 7 et 42 jours de conservation initiale, et les résistances mécaniques correspondantes aux mêmes âges sont données dans le *tableau 3-XII*.

On voit bien la proportionnalité qui existe — à 7 jours comme à 42 jours — entre les déformations et les résistances, et l'on peut dire QU'À RÉISTANCES ÉGALES, les déformations sont d'autant plus importantes que les éprouvettes sont plus jeunes et mises en charge plus tôt.

Les résultats des autres essais sont donnés sous forme de 2 graphiques. On constate sur la *figure 3-12* que les déformations sont d'autant plus élevées que les mélanges sont plus riches en chaux et que l'âge de chargement est plus court. On constate aussi QU'AU DÉCHARGEMENT les éprouvettes reprennent très rapidement et en quelques minutes de l'ordre de 200 à 300 μ/m (seulement). Il subsiste donc une très forte déformation surtout dans le cas des éprouvettes contenant 50 % de chaux et sollicitées à 50 % environ de leur charge de rupture. LES COURBES DE RECOURVANCE OU DE RETOUR ONT DES PENTES TRÈS FAIBLES et qui tendent à se rapprocher de celles du retrait libre des éprouvettes non sollicitées (dans le cas du chargement à 42 jours et pour les ciments sans addition ou avec 25 % de chaux). Nous avons déjà eu l'occasion d'expliquer ce phénomène (voir le chapitre sur l'influence de la finesse de mouture ; déchargement à 180 jours des éprouvettes sollicitées sous 50 kgf/cm^2).

La *figure 3-13* a été tracée pour bien montrer la corrélation qui existe entre les déformations après 28 jours de chargement et les résistances mécaniques correspondantes. Les courbes obtenues sont régulières et l'on voit que le fluage SEUL (déformation totale diminuée de la déformation instantanée et du retrait hydraulique) est à peu près identique à résistance égale pour les éprouvettes mises en charge à 7 ou à 42 jours (il n'en serait pas de même dans le cas des déformations instantanées ou des déformations totales, comme on a pu le voir). On trouverait également que

$$\varepsilon(t) = \frac{K}{R^{2,16}}$$

3.13. Influence de certains adjuvants

3.131. Accélérateurs.

Un CPA 400 (B 216) ayant déjà été utilisé dans l'étude de l'influence des ajouts de constituants secondaires, a été additionné des pourcentages suivants de chlorures ou d'alcalis (par rapport au poids du ciment) :

- 1 et 2 % de Cl_2Ca ,
- 2 % $NaOH$,
- 2 % KOH .

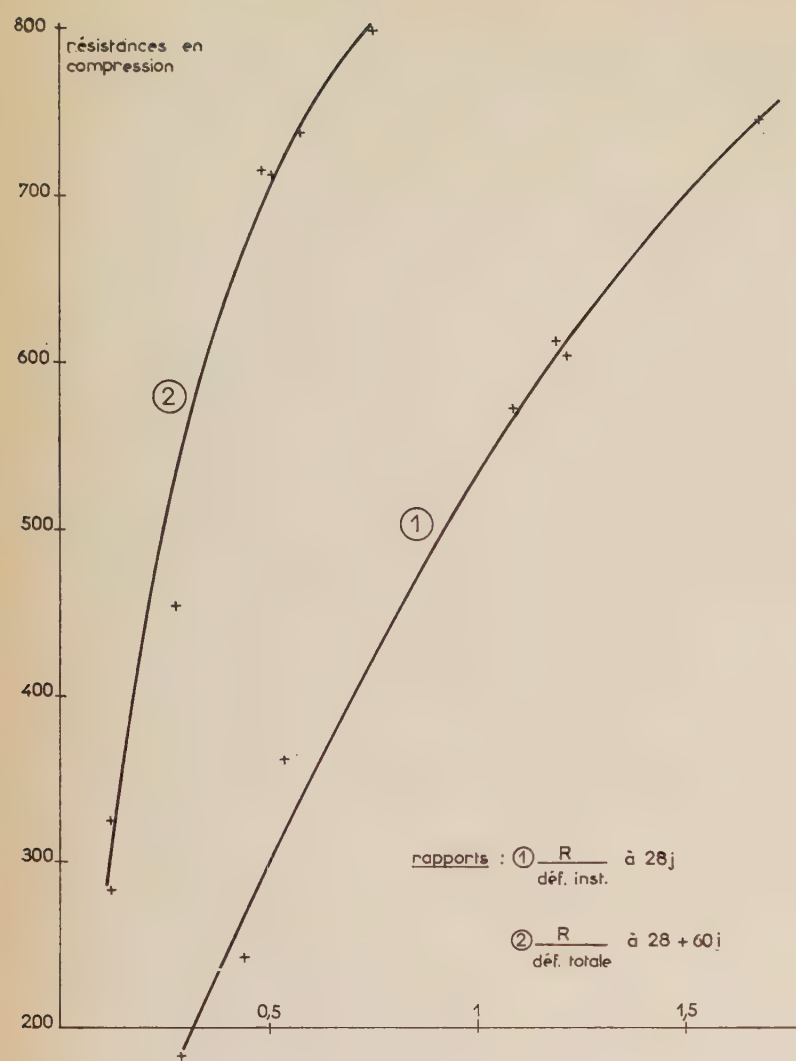


FIG. 3-11

Evolution des "modules" d'après le tableau 3-XI.

$$\frac{\text{Résistance à 28 jours}}{\text{Déformation instantanée}} = \frac{\text{Résistance à 28+60 jours}}{\text{Déformation totale à 28+60 jours}}$$

Ces rapports diminuent régulièrement lorsque les résistances décroissent. Une représentation intéressante de cette constatation est donnée sur la *figure 3-11*.

3.122. Chaux grasse.

Ces essais ont été ENTREPRIS AFIN DE PRÉCISER LA RELATION EXISTANT ENTRE LES RÉISTANCES MÉCANIQUES ET LES DÉFORMATIONS DE FLUAGE. A cet effet, un CPA 400 du commerce a été additionné de chaux grasse $Ca(OH)_2$, à raison de 0 (témoin), 25 et 50 %. Les éprouvettes de béton 0/15 mm, habituelles de $7 \times 7 \times 28$ cm (dosage en liant : 350 kg/m^3) ont été conservées préalablement, soit 7 jours dans l'eau à 20°C, soit 42 jours dans l'eau à 20°C. Après 7 ou 42 jours elles ont été placées dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20°C et chargées sous 50 kgf/cm^2 . Une sollicitation de 100 kgf/cm^2 aurait amené une rupture sous charge lente des éprouvettes contenant 50 % de chaux grasse (résistance habituelle à 7 jours : 140 kgf/cm^2 , résistance probable dans le sens vertical de l'élanement, de l'ordre de 110 kgf/cm^2). Les déformations ont été périodiquement mesurées ainsi que les résistances mécaniques jusqu'à

FIG. 3-12

Influence de la teneur en chaux et de l'âge de chargement sur le fluage en compression. (50 kgf/cm²)

Des éprouvettes en béton 7×7×28 cm ont été rompues en compression après 28 jours de conservation dans l'eau ou après à nouveau 28 jours de conservation dans l'air. Les déformations constatées à 28 jours et à 1 an et sous une contrainte de 150 kgf/cm² ainsi que les déformations initiales et les retraits libres sont donnés sur le *tableau 3-XIII*. LE CHLORURE DE CALCIUM MODIFIE PEU LE FLUAGE PROPREMENT DIT puisque les 3 séries d'éprouvettes comprenant le CPA seul ou additionné de 1 à 2 % de Cl₂Ca ont des déformations analogues à la dispersion près des résultats (d'ailleurs les résistances mécaniques sont voisines). Par contre l'addition d'alcalis augmente les déformations à 28 j et surtout à 1 an (déformations totales et aussi retrait libre). Par exemple à 1 an on obtient avec 2 % de KOH une déformation totale de 2580 μ/m (résistances à 56 j : 570 kgf/cm²) et avec 2 % de NaOH une déformation totale de 2770 μ/m (résistance à 56 j : 510 kgf/cm²). Cela s'explique bien car on constate que la soude et la potasse dimi-

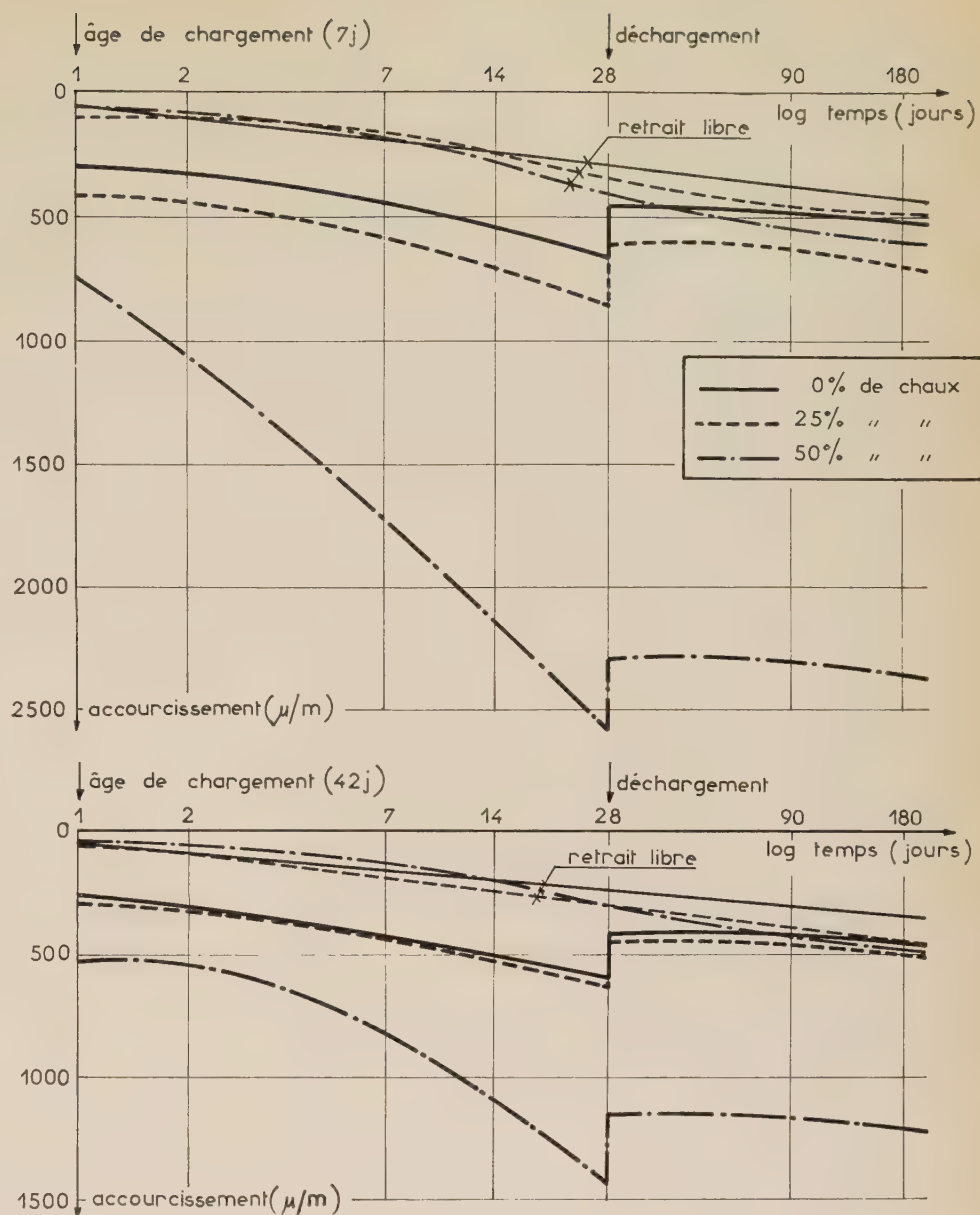


TABLEAU 3-XIII

Relation déformations/résistances mécaniques

Eprouvettes de 7 × 7 × 28 cm

Béton 0/15 mm, 350 kg/m³

Conservation air humide 20° C : 28 jours,

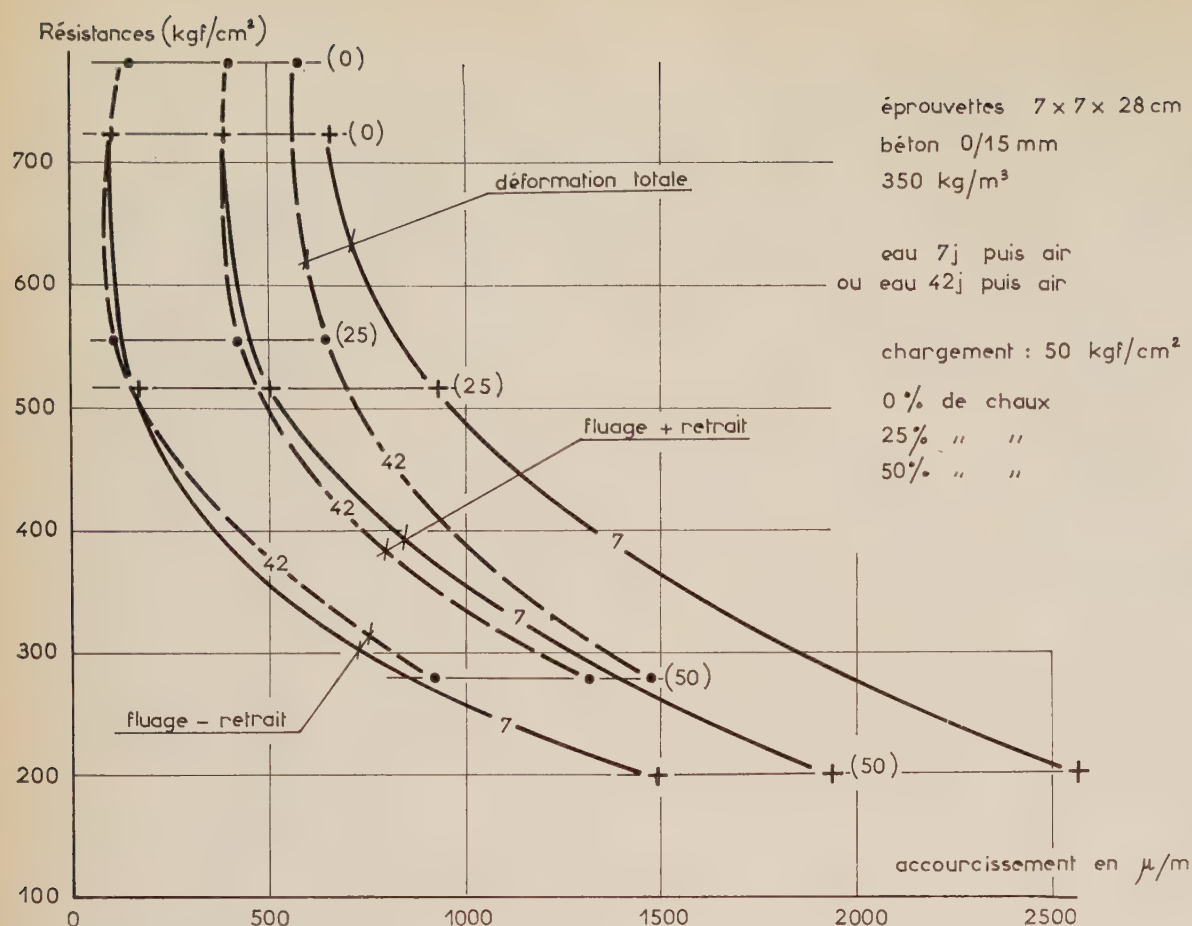
puis air à 50 %

Mise en charge à 28 jours : 150 kgf/cm²

Références des ciments	Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations (μ/m)					Retrait libre (μ/m)		Fluage-retrait libre (μ/m)	
	28 j	28 j + 28 j	28 j (1)	28 j + 28 j (2)	Fluage à 28 j (2) — (1)	1 an (3)	Fluage 1 an (3) — (1)	28 j + 28 j	1 an	28 j + 28 j	1 an
CPA 400 (B 216)	600	710	520	1360	840	2060	1540	280	390	560	1150
CPA 400 + 1 % Cl ₂ Ca	645	760	550	1400	850	2130	1580	320	410	530	1170
CPA 400 + 2 % Cl ₂ Ca	650	770	530	1350	820	1970	1440	330	420	490	1020
CPA 400 + 2 % NaOH	380	510	650	1550	900	2770	2120	170	430	730	1690
CPA 400 + 2 % KOH	470	570	535	1585	1030	2580	2025	280	480	750	1545

FIG. 3-13

Corrélation
résistance/accourcissement.
Mélange CPA + chaux.



nuent les résistances mécaniques : c'est un phénomène connu que nous avons souvent constaté, et il en résulte donc, naturellement un fluage plus élevé. Cette augmentation de fluage est en pourcentage à peu près de l'ordre de grandeur des baisses de résistances mécaniques.

3.132. Entraîneurs d'air.

Cet adjuvant est de plus en plus utilisé pour améliorer les propriétés des bétons frais (plasticité, réduction d'eau) et des bétons durcis (résistances au gel). Comme il peut provoquer des baisses de résistance mécanique on a cherché à savoir quelle serait son influence sur le fluage car d'autres études nous avaient de plus montré que le retrait hydraulique après prise était peu modifié en fonction du volume d'air ajouté. Les essais ont été

effectués, comme les précédents, sur éprouvettes de béton conservées préalablement 7 jours dans l'eau puis chargées sous 150 kgf/cm² de pression et conservées définitivement dans l'air (ciment CPA 400 commercial). On a choisi comme adjuvant un produit tensio-actif, l'abietate de sodium ($C_{19}H_{29}CO_2Na$) qui est assez souvent employé à cet effet dans les bétons. Les doses utilisées (0,22 % à 0,96 % du poids du ciment) ont été préalablement déterminées de façon à avoir des bétons contenant respectivement, environ, 2, 4 et 6 % d'air occlus. Les teneurs en eau ont été ajustées de façon à obtenir des bétons de même plasticité (slump de 4 ± 1 cm). Le tableau 3-XIV donne les résistances à 7 jours et les déformations instantanées à cet âge, puis les résistances et les déformations après 21 jours de conservation dans l'air.

TABLEAU 3-XIV

Air		Plasticité égale		Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations (μ/m)		
% de produit	% air du béton	Eau (l)	E/C	7 j (mise en charge)	7 j + 21 j	Inst.	Après 7 j + 21 j	Fluage à 21 j (+ retrait)
0 (témoin)		171	0,49	410	620	700	1360	660
0,2	2	166	0,475	340	550	945	1720	775
0,5	4	160	0,46	310	440	1260	2190	930
0,9	6	153	0,435	280	380	1310	2420	1110

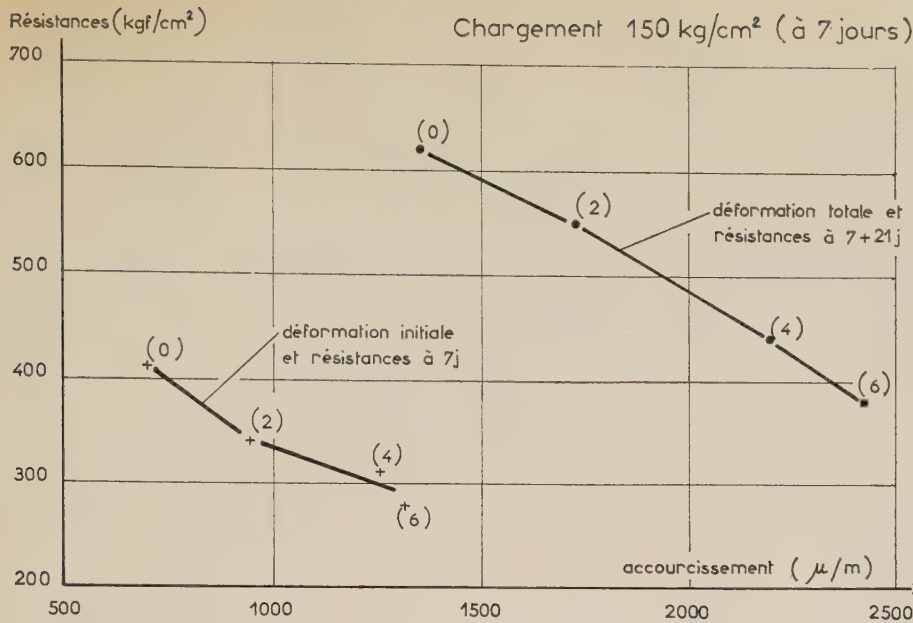


FIG. 3-14

Corrélation résistances/accourcissement.
Influence de l'air occlus (%).

Le retrait hydraulique après prise et à 21 jours était voisin pour toutes les séries et de l'ordre de 300 μ/m .

Ces résultats ont été reportés sur un graphique figure 3-14. On constate :

- que les résistances en compression baissent en fonction du pourcentage d'air occlus,
- que les déformations instantanées, ainsi que les déformations totales (et partant le fluage) sont d'autant plus importantes que le pourcentage d'air occlus est plus élevé,
- que la corrélation est toujours très forte entre les résistances et le fluage,

On peut donc tirer de ces essais les conclusions suivantes :

1) Le fluage augmente lorsque l'on ajoute de plus en plus d'air occlus, mais cette augmentation n'est qu'une conséquence des baisses de résistance mécanique.

2) On trouve ici un cas où il n'y a pas de corrélation entre le retrait hydraulique après prise et le fluage.

3.14. Influence du milieu de conservation

3.141. Carbonatation.

Des essais limités ont été faits pour avoir une idée de l'influence de la carbonatation sur le fluage. Nous avons en effet, déjà eu l'occasion de montrer que les résistances mécaniques d'un béton augmentaient lorsque les constituants hydratés de la pâte de ciment étaient en partie carbonatés.

Comme l'intensité du fluage dépend de la résistance, on pouvait penser qu'une éprouvette carbonatée présentait un fluage plus faible. Pour s'en assurer, nous avons confectionné 2 séries d'éprouvettes en béton 0/15 mm de $7 \times 7 \times 28$ cm dosé à 350 kg de ciment commercial CPA 400 (référence B 648), conservées avant mise en charge 7 jours dans l'eau, puis :

- 2 mois à l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C,
- 2 mois dans une armoire de carbonatation régulée à 50 % d'humidité relative, 20° C et avec une teneur en anhydride carbonique de 70 % en volume.

Les éprouvettes ont été ensuite chargées en compression à 150 bars. Les résultats obtenus sont donnés sur le tableau 3-XV.

Les éprouvettes conservées dans le CO₂ étaient carbonatées sur une épaisseur d'un cm environ ; ON VOIT QU'ELLES ONT

BIEN DES RÉSISTANCES SUPÉRIEURES A CELLES DES ÉPROUVETTES CONSERVÉES DANS L'AIR ORDINAIRE ET QUE, CORRÉLATIVEMENT, LA DÉFORMATION INSTANTANÉE PUIS LE FLUAGE SOUS CHARGE SONT PLUS FAIBLES. L'avantage d'avoir attendu 2 mois avant la mise en charge c'est de solliciter des éprouvettes dont le retrait hydraulique s'est déjà effectué en grande partie (en passant de 2 à 3 mois, ce retrait n'augmente que d'environ 30 microns par mètre ; il ne risque donc pas de trop modifier le fluage proprement dit).

3.142. Température.

Des bétons 0/15 mm de granulats de Seine ont été confectionnés avec deux types de ciment :

— un CPA 400 (surface spécifique Blaine : 3 360 cm²/g, début de prise à 20° C : 3 h 30 mn, fin de prise : 7 h) ;

— un CPA 400 (surface spécifique Blaine : 3 380 cm²/g, 15 % de laitier, début de prise à 20° C : 4 h, fin de prise : 7 h 30 mn).

Le dosage en ciment a été de 400 kg/m³ et le rapport E/C de 0,40 (mise en place énergique par vibration sur table). Les essais ont été faits sur éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm mises en charge dans les bâtis standards et après une conservation préalable de 6 jours dans l'eau. Elles ont alors été placées pendant 1 jour dans 3 milieux différents à 5, 20 et 40° C (50 % d'humidité relative), puis chargées sous une contrainte de com-

TABEAU 3-XV

Conservation préalable 2 mois à 50 % d'H.R. et 20° C	Résistances en compression (kgf/cm ²)		Déformations (μ/m)		
	A la mise en charge	Après + 1 mois	Au charge- ment	Après + 1 mois	Fluage calculé (avec retrait)
air	490	640	640	1170	530
CO ₂ (70 % en volume)	770	790	560	970	410

TABLEAU 3-XVI

Ciments	Température °C	Résistances mécaniques (kgf/cm²)				Retrait μ/m 1 an	Déformation totale μ/m 1 an	Coefficient de dilatation thermique
		7 jours		90 jours				
		TF	C	TF	C			
CPA 400	5	20° C : 60	20° C : 570	80	770	520	1700	8,3 μ/m . °C mesuré à 28 jours
	20			78	750	450	1730	
	40			73	680	250	1750	
CPAL 400	5	20° C : 54	20° C : 500	72	780	580	2000	
	20			69	740	500	2070	
	40			68	670	280	—	

pression de 150 kgf/cm² (soit un peu moins du tiers de leur résistance en compression).

Des éprouvettes non chargées ont servi de témoin de retrait et d'autres ont été conservées sans contrainte, dans les mêmes conditions, et rompues en compression et en traction-flexion à différents âges et jusqu'à 90 jours. Enfin les coefficients de dilatation thermique ont été mesurés entre 5 et 40°C. Les principaux résultats sont donnés sur le *tableau 3-XVI*. Les résistances mécaniques sont élevées.

Le fait de conserver après 7 jours les éprouvettes dans l'air à 50 % d'humidité relative modifie peu les résistances à 90 jours (il n'en aurait pas été de même si les éprouvettes avaient été conservées dans cette ambiance sitôt après leur démoulage).

A trois mois d'âge LES RÉSISTANCES MÉCANIQUES sont d'autant plus élevées que la conservation est effectuée à une température plus basse : c'est d'ailleurs une constatation assez générale. LE COEFFICIENT DE DILATATION THERMIQUE a été mesuré sur des éprouvettes conservées d'abord 7 jours dans l'eau à 20° C puis 21 jours dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C. Ces éprouvettes ont été maintenues jusqu'à stabilisation dimensionnelle à 5° C, 20° C, ou 40° C (des séries de cycles ont été effectuées). Le coefficient de dilatation thermique est analogue avec le béton CPA 400 et le béton de CPAL 400 (à la dispersion près des résultats) : il est de l'ordre de 8,3 μ/m et par °C.

LE RETRAIT HYDRAULIQUE après prise semble beaucoup diminuer lorsque la température augmente, et inversement il semble augmenter lorsque la température baisse (à hygrométrie constante). En fait il faut tenir compte du coefficient de dilatation thermique. On s'aperçoit alors qu'à la dispersion près des résultats (aussi bien sur les valeurs des retraits que sur celles des coefficients de dilatation thermique) et étant donné que l'on ne peut pas garantir à 5, 20 et 40° C une humidité relative rigoureusement identique et égale à 50 %, les variations dimensionnelles à 40° C ou à 5° C peuvent se prévoir à partir de celles obtenues à 20° C.

Les courbes de déformations sont données pour les ciments CPA 400 et CPAL 400 sur les *figures 3-15 et 3-16*. On remarque :

— que les déformations totales ainsi que la somme du fluage et de la déformation instantanée croissent régulièrement en fonction du logarithme du temps,

— qu'à 20° C la déformation totale est à 2 mois égale au double de la déformation instantanée et à 1 an égale à 2 fois et demi cette déformation,

— que le fluage est un peu plus important avec le CPAL 400 qu'avec le CPA 400 (ce qui est normal puisqu'au chargement ce dernier a des résistances un peu plus élevées),

— que l'élévation de la température augmente les déformations aux premiers âges. On constate par contre qu'à 1 an les déformations totales sont peu influencées par les différences de températures (à cet âge les éprouvettes sont stabilisées en ce qui concerne leur teneur en eau).

REMARQUE

Ces essais sont délicats à effectuer. On a cependant vérifié qu'aucune correction n'était à apporter aux manomètres utilisés travaillant dans la gamme 0-80° C (et a fortiori pour 5-40° C). Compte tenu des résultats ci-dessus on peut cependant dire que LE FLUAGE A LONG TERME SEMBLE ÊTRE INDÉPENDANT DE LA TEMPÉRATURE. Il n'en serait peut-être pas de même aux tout premiers âges, ni dans le cas du fluage en flexion (comme nous le verrons plus loin).

3.15. Phénomène de recouvrance sur pâte pure

Conditions des essais.

Un CPA 400 (A 878) du commerce a été utilisé pour confectionner en pâte pure (rapport E/C = 0,26) des éprouvettes de 7 × 7 × 728 cm. Les caractéristiques principales de ce ciment sont les suivantes :

- surface spécifique Blaine : 3120 cm²/g,
- temps de prise (h et mn) :
début : 3.50 fin : 7.15
- résistances en compression (kgf/cm²) :
à 28 jours : 540 kgf/cm² sur mortier 1/3,
800 kgf/cm² sur pâte pure,
à 90 jours : 1030 kgf/cm² sur pâte pure,
à 1 an : 1260 kgf/cm² sur pâte pure.

Les éprouvettes ont toutes été conservées 28 jours dans l'eau puis ont été contraintes sous 0 (témoin), 50, 100 et 150 kgf/cm².

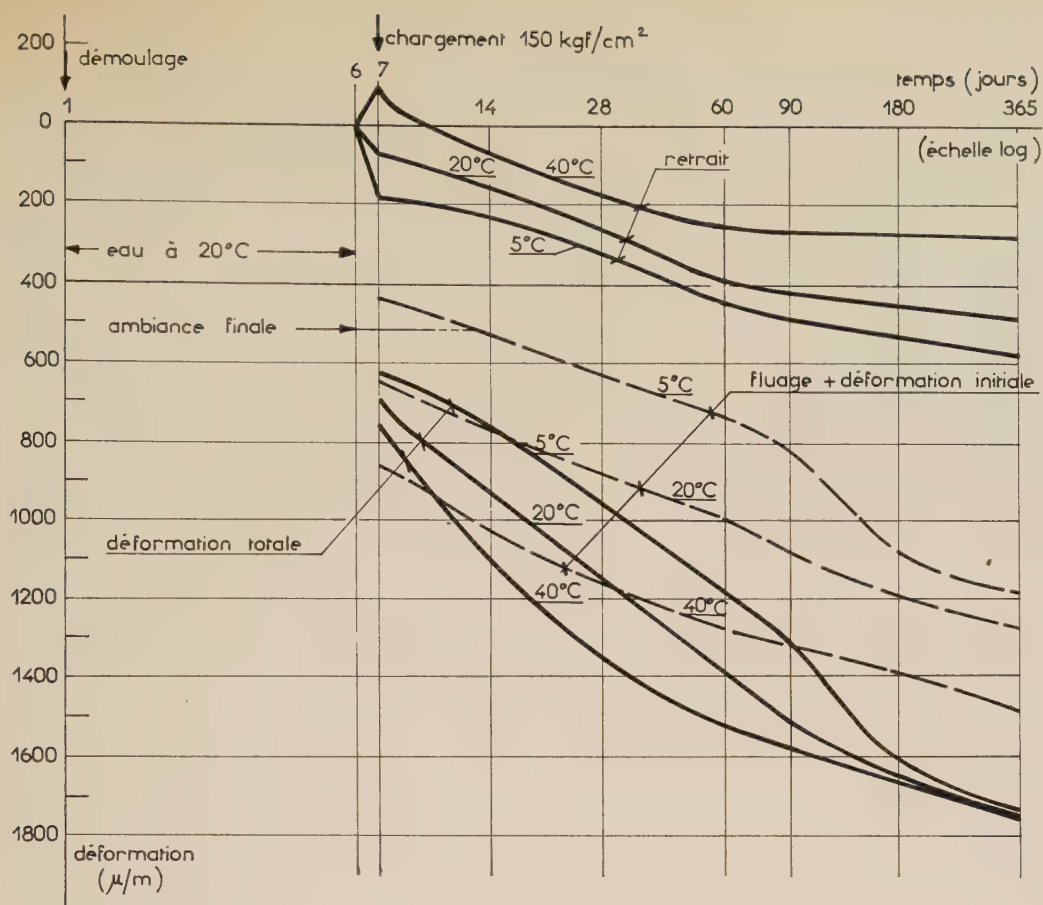


FIG. 3-15

Influence de la température sur le retrait et le fluage dans l'air à 50 % d'humidité relative. Eprouvettes béton 0/15 mm, 7×7×28 cm. CPA 400.

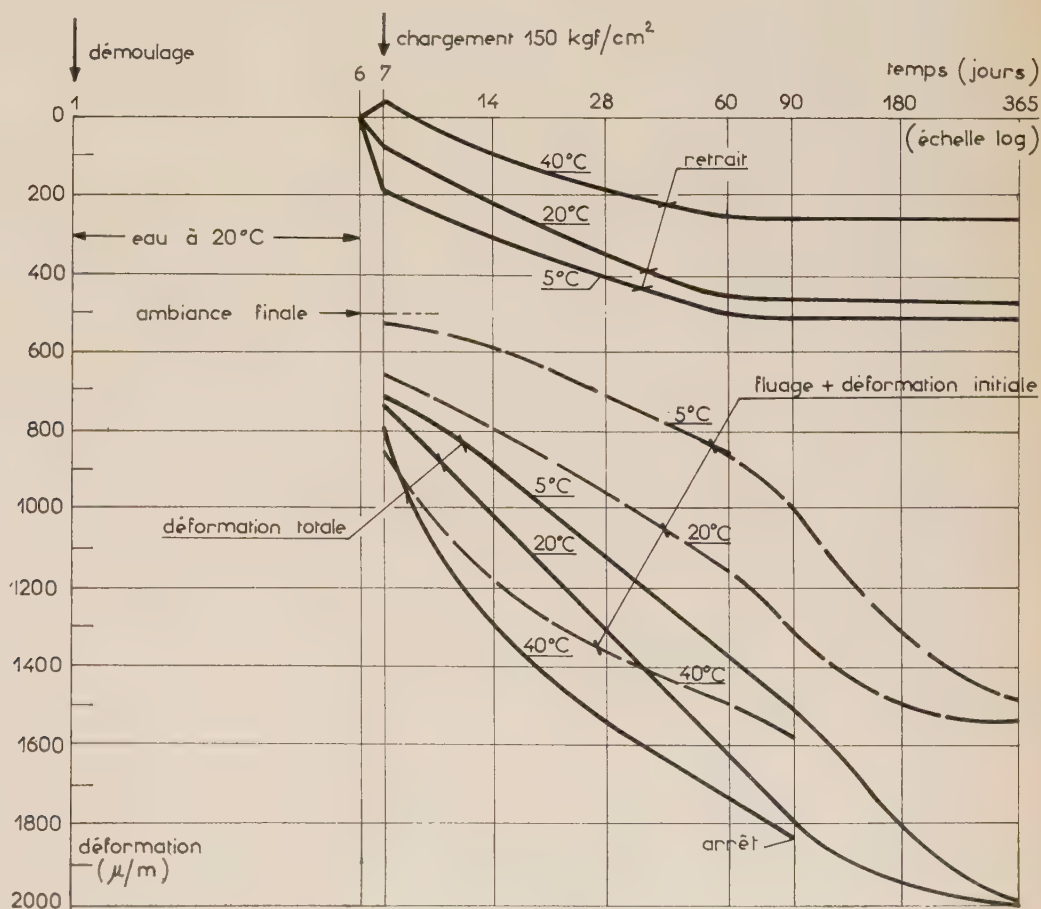


FIG. 3-16

Influence de la température sur le retrait et le fluage dans l'air à 50 % d'humidité relative. Eprouvettes béton 0/15 mm, 7×7×28 cm. CPAL 400.

Certaines d'entre elles ont été déchargées après 28 jours puis laissées sans charge ou rechargées après à nouveau 28 jours (dans chaque cas il existe toujours un témoin chargé). Cet essai

avait pour but de connaître l'allure des courbes de retour et la valeur des déformations résiduelles et de voir si dans ce cas, le corps étudié peut être assimilé à un corps de BOLTZMANN.

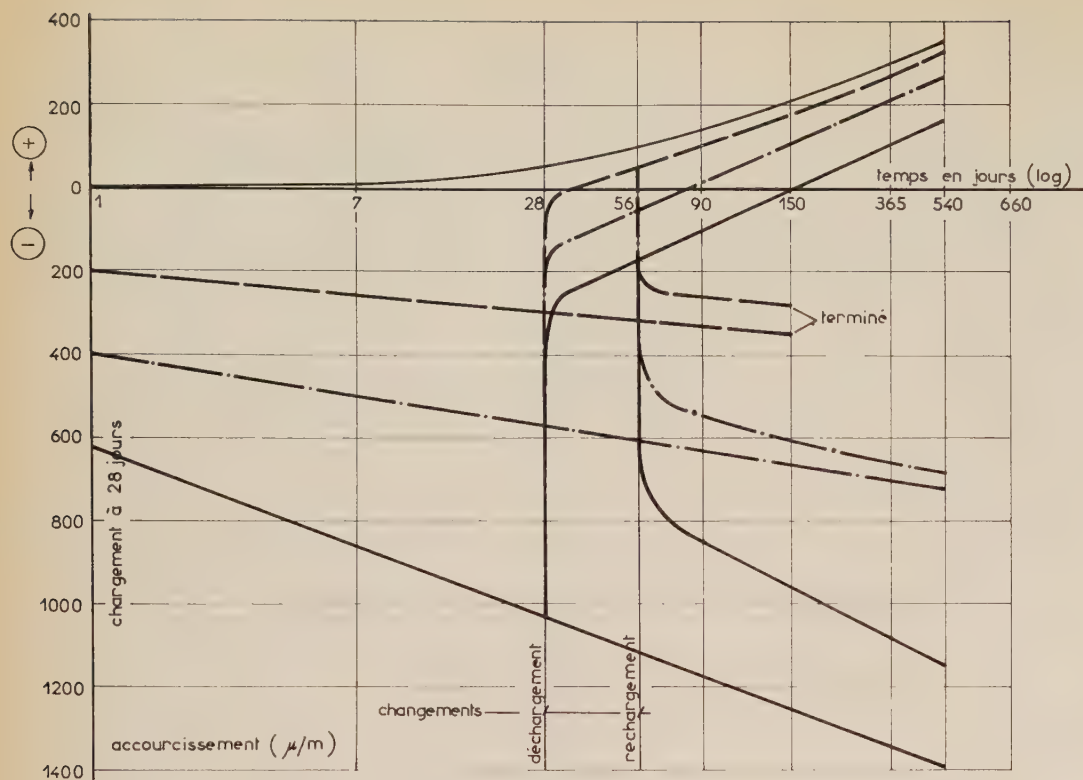


FIG. 3-17

Schéma : courbe de fluage et de relaxation (1^{er} chargement à 28 jours).
Eprouvette 7 × 7 × 28 cm.
Eau à 20° C. Pâte pure.

Résultats obtenus.

Ils sont donnés sur la figure 3-17 sous forme de courbes. On constate à nouveau que :

- la déformation instantanée sous charge est proportionnelle à la charge appliquée,
- le fluage est proportionnel au logarithme du temps.

Après déchargement, très rapidement le matériau regonfle de la valeur de la déformation instantanée, mais il ne rattrape pas le témoin non chargé ; il subsiste à 150 jours une déformation permanente qui est d'autant plus importante que la contrainte appliquée a été plus élevée. Cette déformation permanente est à 150 jours de :

- + 30 μ/m pour 50 kgf/cm^2 ,
- + 120 μ/m pour 100 kgf/cm^2 ,
- + 210 μ/m pour 150 kgf/cm^2 .

Pour l'instant il semble bien que la pâte pure ait un comportement qui se rapproche de celui d'un corps de BOLTZMANN mais seulement pour une faible contrainte appliquée, de l'ordre de 50 kgf/cm^2 .

En chargeant à nouveau les éprouvettes, on obtient une déformation instantanée du même ordre que la déformation instantanée initiale, mais par contre le fluage est long à rattraper le fluage du témoin (il ne le rattrapera peut-être jamais dans le cas de 150 kgf/cm^2). Les pentes des courbes sont analogues au 2^e et au 1^{er} chargement, à la dispersion près des résultats.

Remarque d'ordre expérimental.

On a pu constater que la température de l'eau de conservation avait une grande influence sur les mesures. Elle doit être maintenue à $20 \pm 0,5^\circ C$: des écarts plus importants conduisent à de fortes dispersions. La précision des mesures est de l'ordre de $\pm 40 \mu/m$.

Des précautions spéciales sont à prendre afin d'éviter le décollement des plots de mesure lors de la conservation sous contrainte dans l'eau et il faut traiter les bâtis afin d'éviter leur corrosion.

3.2. RESULTATS OBTENUS EN TRACTION PURE

3.21. Dispersion des essais

Neuf éprouvettes de $2 \times 2 \times 28$ cm ont été confectionnées en mortier 1/3 AFNOR avec un CPA 400 (A 869). Ces éprouvettes, après une conservation préalable de 7 jours dans l'eau à $+20^\circ C$, ont été placées dans l'air et soumises à une charge de 30 kg (soit une contrainte de 7,5 kgf/cm^2). La résistance moyenne de ces éprouvettes était alors de 76 kgf/cm^2 en traction-flexion (soit environ 45 kgf/cm^2 en traction pure) et 350 kgf/cm^2 en compression.

La déformation moyenne après chargement est de 8 μ/m , ce qui correspondrait à un module de 100 000 kgf/cm^2 . Après 28 jours de fluage, les déformations suivantes sont obtenues en μ/m (les valeurs seraient négatives, car le retrait libre est plus élevé que le fluage) : 354, 366, 378, 384, 390, 408, 414, 414, 426. Cela représente une moyenne de $-393 \mu/m$ pour un retrait libre moyen de $-445 \mu/m$ d'où le fluage correspondant : 58 μ/m .

Les mesures sont assez dispersées, ce qui était prévisible étant donné les faibles valeurs absolues des déformations. La dispersion est la suivante sur cette série de 9 éprouvettes à 28 jours :

- écart-type : 24,5 μ/m .

3.22. Influence du taux de chargement

Des éprouvettes de $2 \times 2 \times 28$ cm en mortier 1/3 de CPA 400 (B 188) ont été essayées après une conservation préalable de 28 jours dans l'eau à $20^\circ C$. Elles ont ensuite été placées dans une salle à 50 % d'humidité relative et $20^\circ C$, et tractées sous des charges de 40, 80 et 120 kgf , correspondant respectivement à des contraintes de 10, 20 et 30 kgf/cm^2 . Les résultats figurent sur le graphique 3-18.

Les déformations totales progressent d'abord en fonction du logarithme du temps puis tendent à se stabiliser. Le fluage seul

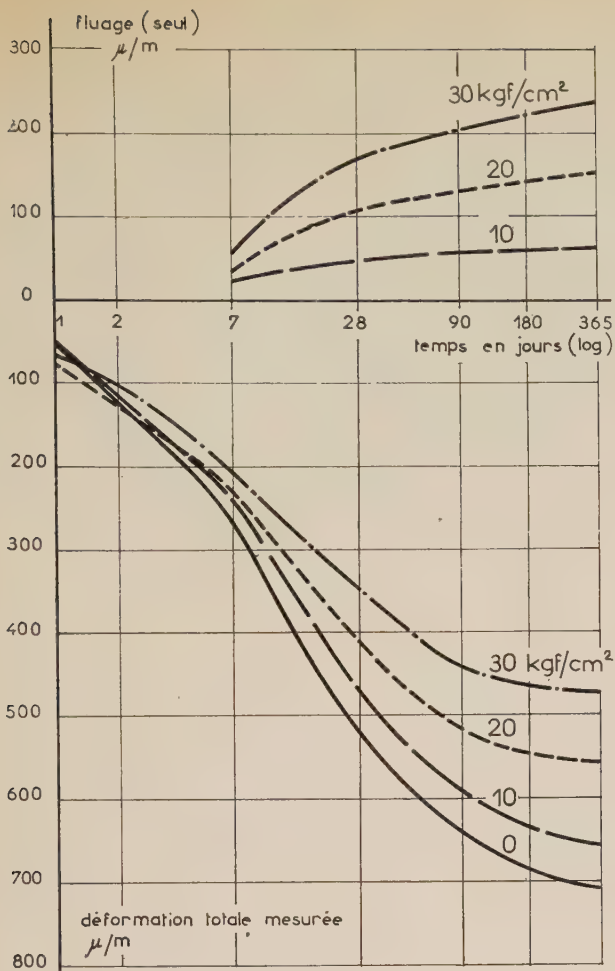


FIG. 3-18

Influence du taux de chargement sur le fluage en traction pure. Mortier 1/3 AFNOR.

(obtenu par différence entre la déformation totale et le retrait hydraulique libre) progresse régulièrement dans le temps : il est proportionnel à la charge appliquée. Les déformations instantanées au chargement (temps 0, non représenté sur le graphique) sont respectivement de + 30, + 55 et + 75 μ/m pour des contraintes de 10, 20 et 30 kgf/cm^2 . A la dispersion près des résultats la déformation instantanée est à peu près proportionnelle à la charge appliquée.

On remarque que l'on a une déformation de 75 μ/m pour une contrainte de chargement de 30 kgf/cm^2 , soit un module de déformation E de 400 000 kgf/cm^2 . Cela est logique car la résistance en compression était, à cet âge, de 550 kgf/cm^2 .

TABLEAU 3-XVII

Ciments	Résistances à 28 j (kgf/cm^2)		Déformation à 1 an μ/m		
	TF	C	Retrait libre	Déform. totale	Fluage
Ciment "A" (B 218)	92	1030	400	370	30
CPA 400 (B 188)	115	550	700	550	150
Ternaïre (B 217)	38	95	—	—	—
XEH (B 219)	63	190	890	390	500

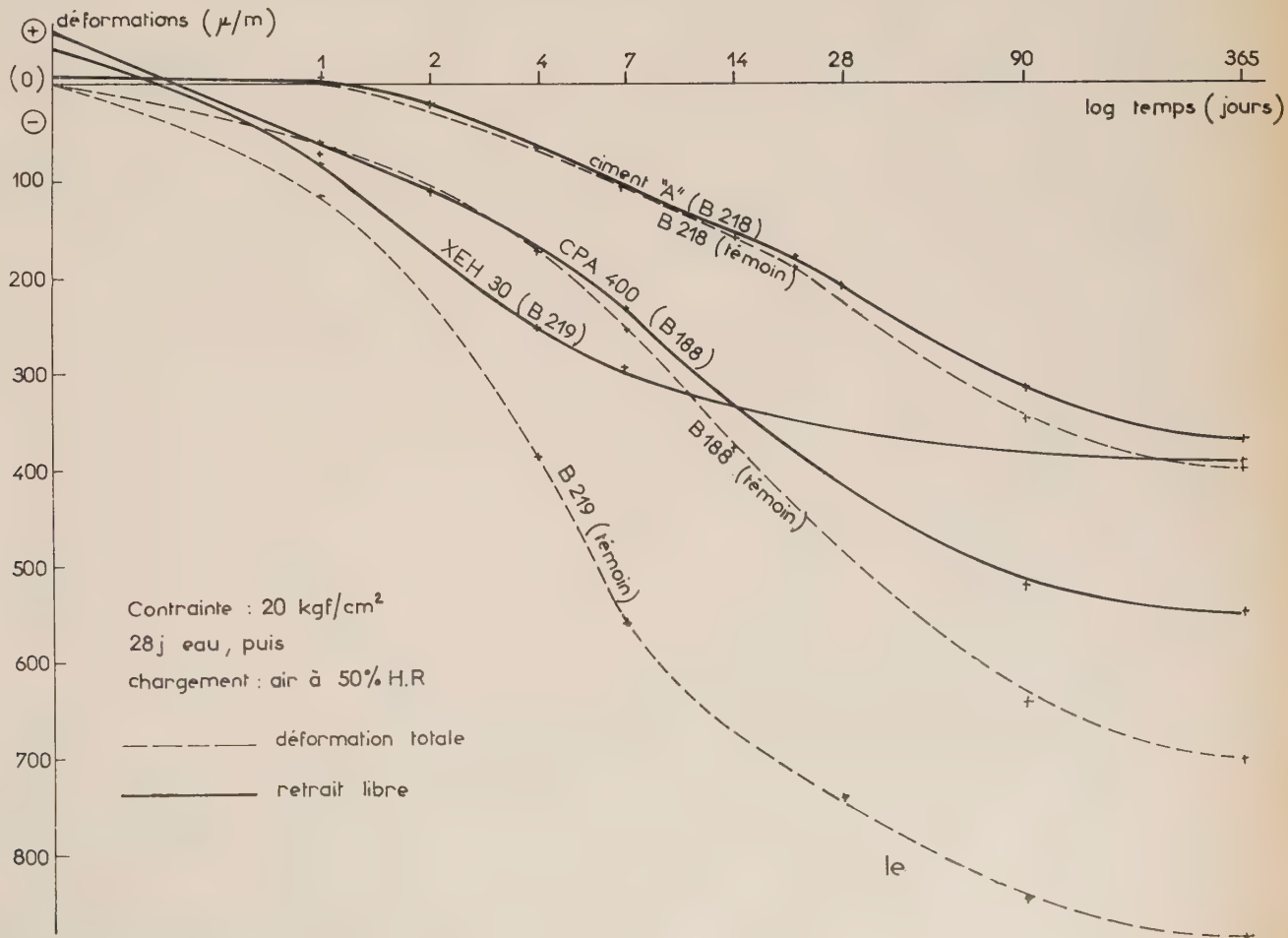


FIG. 3-19

Influence de la nature du liant sur le fluage en traction pure. Mortier 1/3 AFNOR.

3.23. Influence de la nature du ciment

Dans les mêmes conditions que précédemment, mais avec un seul taux de chargement de 80 kgf correspondant à une contrainte de 20 kgf/cm², on a essayé quatre liants hydrauliques différents. Les résultats sont donnés complémentirement sur la figure 3-19 et le tableau 3-XVII jusqu'à 1 an.

Le fluage en traction proprement dit est d'autant plus faible que le ciment a de plus fortes résistances mécaniques. Une corrélation très nette apparaît entre les résistances en compression (à 28 j) et le fluage à 1 an (la corrélation ne serait pas bonne dans le cas de la résistance en traction par flexion). C'est ce que montre la figure 3-20 : la corrélation est bien ici mise en évidence car on a opéré avec des ciments ayant des caractéristiques très différentes. Les éprouvettes en ciment ternaire se sont rompues après 7 jours, le retrait libre était alors de 300 µ/m, la déformation totale de traction de 180 µ/m et la résistance en traction pure de 20 kgf/cm² (le module correspondant serait d'environ 100 000 kgf/cm²).

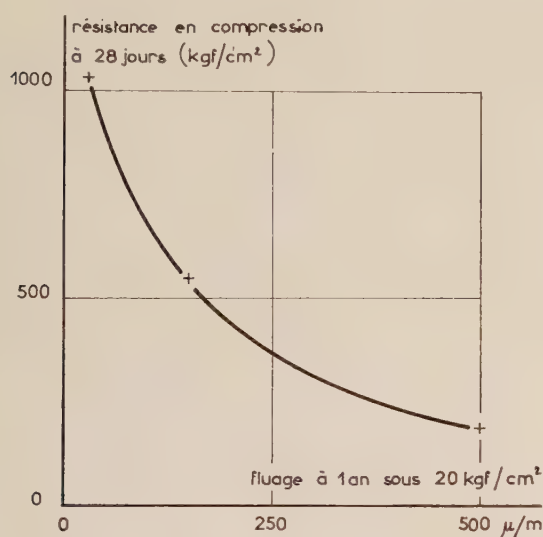


FIG. 3-20

Relation résistance en compression et fluage en traction.

3.3. RESULTATS OBTENUS EN FLEXION

3.31. A l'aide du premier type d'appareil

Ces essais avaient pour but la mise au point de l'appareil avant la construction du 2^e type d'appareil et la détermination :

- des déformations instantanées sous charge,
- des déformations lentes sous charge.

3.311. Résultats relatifs aux déformations instantanées.

Deux ciments ont été utilisés :

- un CPA 400 (référence A 786, masse volumique $\rho = 3,13$ g/cm³, surface Blaine = 3 500 cm²/g) ;
- un liant à maçonner (référence A 616, masse volumique $\rho = 2,88$, surface Blaine = 6 300 cm²/g).

Les éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm en béton ont été chargées jusqu'à rupture, soit sitôt après le démoulage à 8 h (ou 16 h) et 24 h, soit après 2, 7, 28 et 90 jours de conservation (à l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C, ou à l'eau à 20° C). La vitesse de chargement a été de $P = 50$ kg toutes les 30 secon-

des (ce qui correspond à $p = 5$ kgf/cm² de contrainte en traction-flexion).

Les flèches obtenues en microns sont données en fonction des contraintes p en kgf/cm² par 2 graphiques (figures 3-21 et 3-22) relatifs l'un au CPA 400, l'autre au liant à maçonner.

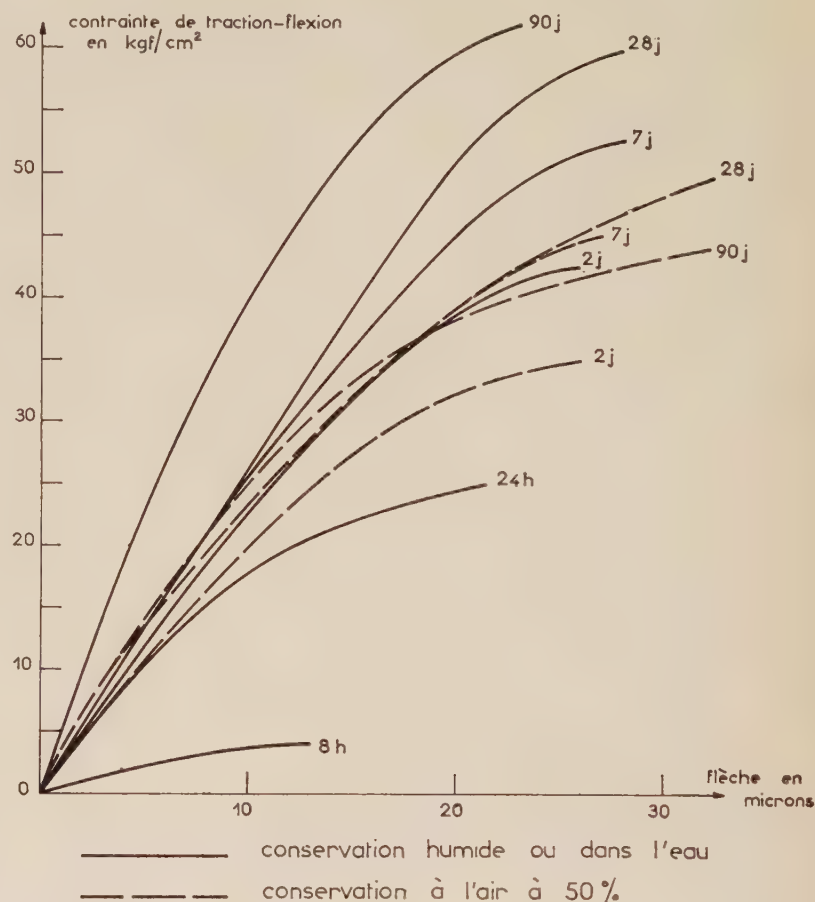


FIG. 3-21

Déformations sous charge jusqu'à rupture.
Eprouvettes en béton de 7 × 7 × 28 cm - CPA 400 (A 786)

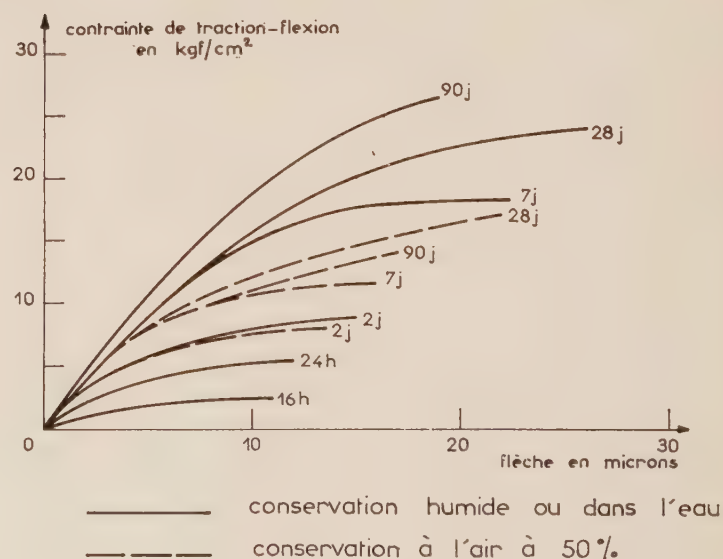


FIG. 3-22

Déformations sous charge jusqu'à rupture.
Eprouvettes en béton de 7 × 7 × 28 cm - Liant à maçonner (A 616)

Les *tableaux 3-XVIII et 3-XIX* indiquent les principales valeurs obtenues ou calculées. Les résultats montrent que les courbes sont très régulières et qu'elles s'infléchissent d'autant moins que le béton est plus âgé et conservé dans l'eau.

Pour une conservation dans l'air, les courbes à 7, 28, et 90 jours sont très proches les unes des autres. Pour une contrainte donnée, la flèche est d'autant plus grande que le béton est plus jeune ou est conservé à l'air, c'est-à-dire qu'il est moins résistant. La flèche à la rupture augmente avec l'âge du béton, mais il semble y avoir un maximum qui aurait lieu dans le cas d'une conservation dans l'eau, après 28 jours. Le module d'élasticité dynamique E_d est difficile à apprécier (tangente aux courbes). La valeur du module calculé à l'aide de la formule $21000 \sqrt{R}$ est souvent assez peu éloigné de la valeur obtenue en prenant la tangente à la courbe. Le module de déformation à la rupture E_1 est beaucoup plus faible et souvent de l'ordre de la moitié

des précédents modules dans le cas du CPA 400 et parfois du tiers dans le cas du liant à maçonner. Le liant à maçonner a des résistances beaucoup plus faibles que le CPA et partant des modules plus faibles. Mais pour une contrainte de rupture égale, la flèche et les modules peuvent être très voisins pour les deux liants. On le voit bien en comparant :

— le CPA 400 conservé 24 h dans l'eau avec le liant à maçonner conservé 90 jours dans l'eau.

3.312. Résultats relatifs aux déformations lentes sous charge.

Deux essais ont été faits pour avoir un ordre de grandeur des fluages obtenus en flexion sous des taux de chargement élevés. A cet effet deux éprouvettes de $7 \times 7 \times 28$ cm en béton CPA 400 (A 786) ont été préalablement conservées dans l'eau à 20° C pendant 2 mois puis placées dans l'air à 50 %

TABLEAU 3-XVIII

Déformation sous charge jusqu'à rupture

Essais en traction-flexion — Epreuves en béton de $7 \times 7 \times 28$ cm — Ciment CPA 400 (A 786)

Conser- vation	Temps	8 h	24 h	2 j	7 j	28 j	90 j
EAU	Contraintes kgf/cm ²	4,2	25	43	53	60	62
	Flèche μ	13	21,5	26	28	28	23
	Module de déformation à la rupture E_1	42 000	151 000	215 000	246 000	278 000	350 000
	Module d'élasticité dynamique E_d	90 000	310 000	375 000	440 000	440 000	600 000
	Résistance en compression kgf/cm ² R	16	152	294	515	581	662
	Module calculé $21\,000 \sqrt{R}$	84 000	260 000	360 000	476 000	506 000	540 000
AIR	Contraintes kgf/cm ²	Mêmes valeurs (essais au démoulage)		35	45	49	44
	Flèche μ			26	27	33	32
	Module de déformation à la rupture E_1			175 000	217 000	193 000	179 000
	Module d'élasticité dynamique E_d			325 000	430 000	430 000	440 000
	Résistance en compression kgf/cm ² R			284	430	460	494
	Module calculé $21\,000 \sqrt{R}$			354 000	435 000	450 000	466 000

$$E_1 = \frac{13 \text{ cm}^{-1} \times \text{contrainte (kgf/cm}^2) \times 10\,000}{\text{flèche } (\mu)} \text{ kgf/cm}^2$$

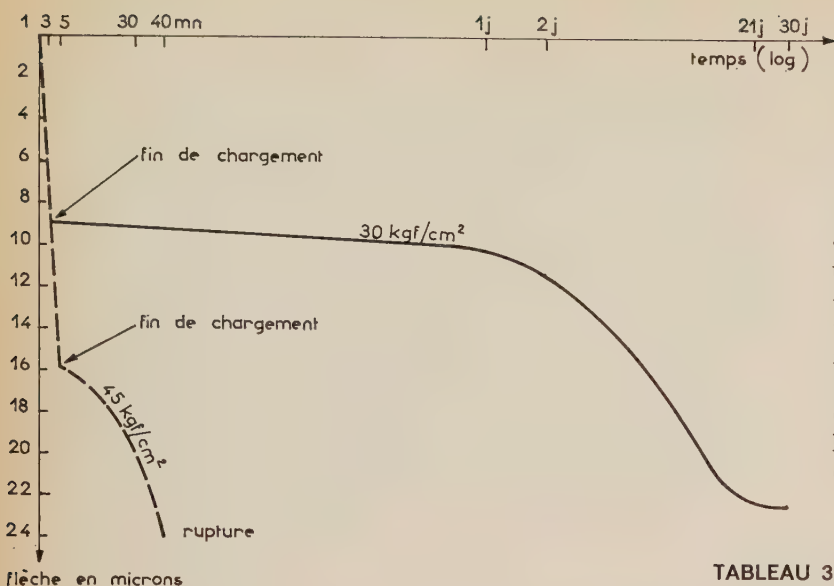


FIG. 3-23

Déformation lente sous charge.
Essais de traction-flexion sur éprouvettes en béton
de 7 × 7 × 28 cm à 2 mois d'âge.

d'humidité relative. Elles ont été ensuite chargées en 3 mn à une contrainte de 30 kgf/cm² et en 5 mn à une contrainte de 45 kgf/cm². La figure 3-23 donne les résultats obtenus. On constate que pour la contrainte de 45 kgf/cm² l'éprouvette s'est rompue après 40 mn de chargement. L'augmentation de la flèche (passant de 16 à 24 microns) est donc très importante : c'est ce que montre le graphique. Pour la contrainte de 30 kgf/cm², la flèche obtenue à 1 mois (22,5 microns) est 2 fois 1/2 plus élevée que celle obtenue sitôt après le chargement initial (9 microns).

TABLEAU 3-XIX

Déformation sous charge jusqu'à rupture

Essais en traction-flexion — Eprouvates en béton de 7 × 7 × 28 cm — Liant à maçonner (A 616)

Conservation	Temps	16 h	24 h	2 j	7 j	28 j	90 j
EAU	Contraintes kgf/cm ²	2,7	5,2	9	18,5	24	26
	Flèche μ	11	12	15	22,5	26	19
	Module de déformation à la rupture E _i	32 000	56 000	78 000	107 000	120 000	178 000
	Module d'élasticité dynamique E _d	90 000	170 000	220 000	260 000	260 000	310 000
	Résistance en compression kgf/cm ² R	12	21	42	79	102	130
	Module calculé 21 000 √R	73 000	96 000	136 000	187 000	210 000	240 000
AIR	Contraintes kgf/cm ²	Mêmes valeurs (essais au démoulage)		8	11,5	17	14
	Flèche μ			13,5	15	22	16
	Module de déformation à la rupture E _i			77 000	77 000	100 000	114 000
	Module d'élasticité dynamique E _d			210 000	230 000	230 000	230 000
	Résistance en compression kgf/cm ² R			41	66	72	107
	Module calculé 21 000 √R			135 000	170 000	178 000	217 000

$$E_i = \frac{13 \text{ cm}^{-1} \times \text{contrainte (kgf/cm}^2) \times 10\,000}{\text{flèche (}\mu\text{)}} \text{ kgf/cm}^2$$

3.32. A l'aide du deuxième type d'appareil

Ce deuxième type d'appareil permet d'étudier le FLUAGE EN FLEXION sous charge concentrée et sur éprouvettes de 120 cm de long reposant sur deux appuis distants de 100 cm (épreuve de 5×10 cm de section dont 5 cm de hauteur).

1^{re} étude.

Trois éprouvettes en mortier 1/3 AFNOR en CPA 400 ont été confectionnées et conservées 28 jours en atmosphère humide à $+20^\circ\text{C}$, puis placées dans une salle à 50 % d'humidité relative et 20°C :

1^{re} éprouvette : chargement central de 25 kg correspondant à une contrainte maximale de 15 kgf/cm^2 (soit environ 20 % de la charge de rupture), mesure périodique des flèches au centre de la poutre.

2^e éprouvette : même dispositif de chargement et de mesure. Cette deuxième éprouvette a été déchargée après 28 jours. On a tracé la courbe de retour.

3^e éprouvette : témoin muni de trois bases de mesure distantes de 20 cm. Cette éprouvette sert à la mesure du retrait "libre".

Les résultats obtenus jusqu'à 18 mois sont donnés sur la figure 3-24. Au chargement les flèches centrales ont été de :

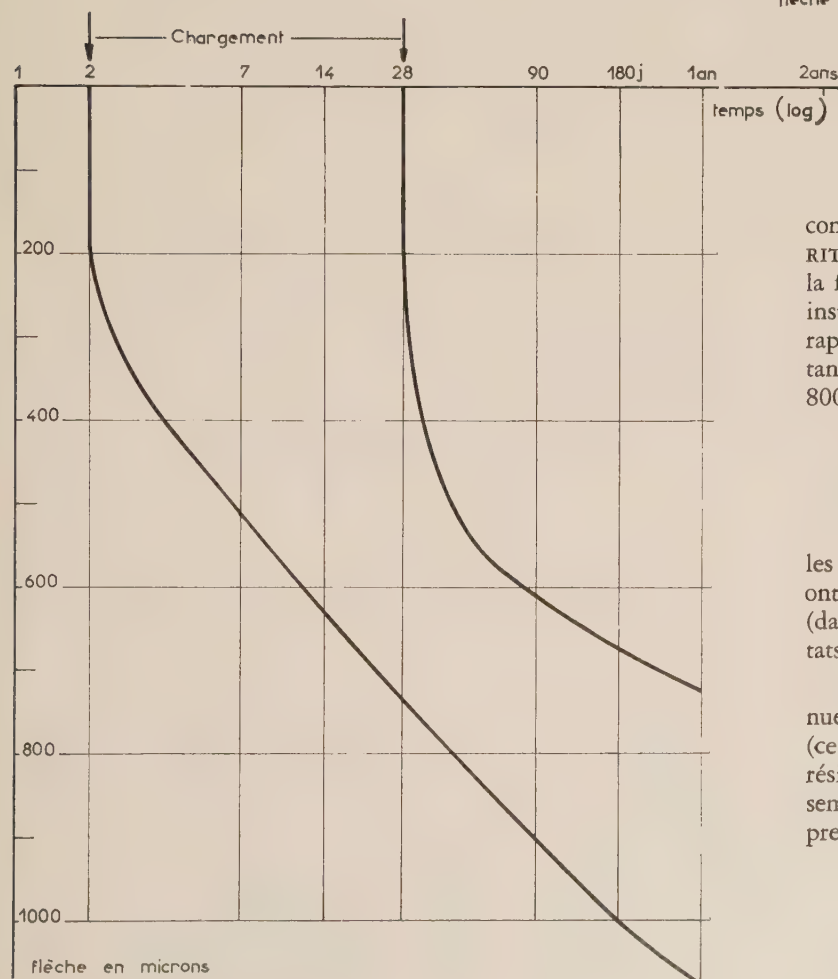
$$f = 25\ \mu\text{ pour } P = 5\text{ kg,}$$

$$f = 85\ \mu\text{ pour } P = 15\text{ kg,}$$

$$f = 140\ \mu\text{ pour } P = 25\text{ kg.}$$

On sait que :

$$f = 200 \frac{P}{E}$$



d'où l'on déduit le "module instantané" (chargement en 2 mn environ)

$$E = \frac{P}{f} = \frac{200 \times 25}{0,014} \approx 357\,000\text{ kgf/cm}^2.$$

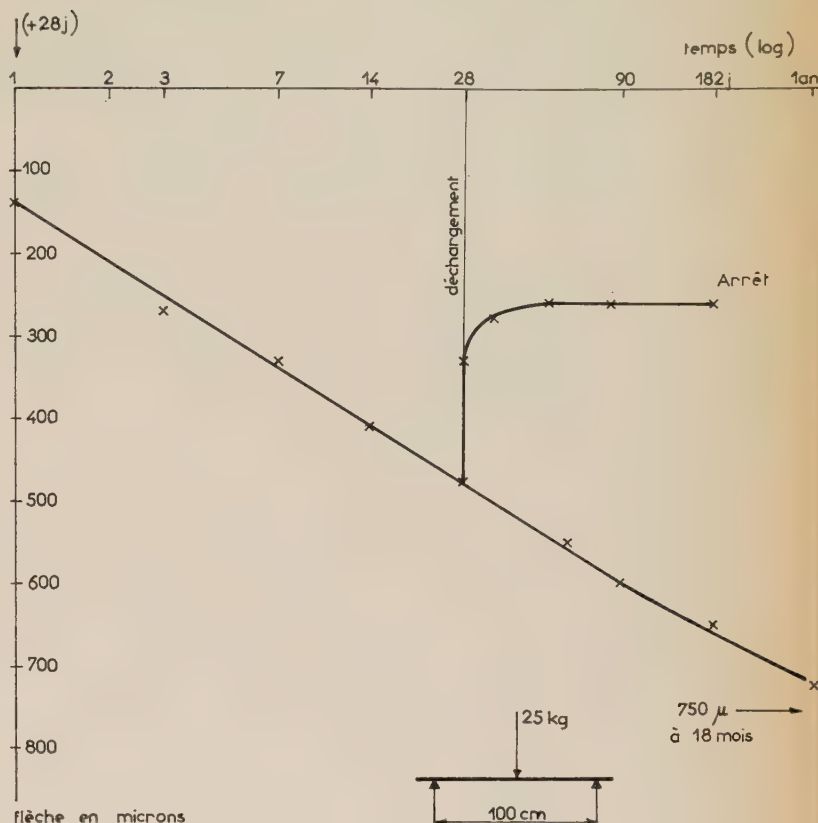


FIG. 3-24

Fluage sur poutre de $5 \times 10 \times 120$ cm.
Mortier 1/3 AFNOR (distance entre appuis : 100 cm.
Chargement : 25 kg).

On constate que le fluage en flexion (comme le fluage en compression) PROGRESSE LINÉAIREMENT EN FONCTION DU LOGARITHME DU TEMPS (au moins jusqu'à 18 mois). Au déchargement, la flèche diminue très rapidement de la valeur de la déformation instantanée puis la courbe de retour semble se stabiliser assez rapidement. Il subsiste une déformation permanente assez importante. Le retrait libre est de l'ordre de $450\ \mu/\text{m}$ à 1 mois, de $800\ \mu/\text{m}$ à 6 mois et de $890\ \mu/\text{m}$ à 18 mois.

2^e étude.

Influence du temps de conservation initiale.

Six poutrelles en mortier 1/3 ont été confectionnées dans les mêmes conditions que lors de la 1^{re} étude. Trois éprouvettes ont été chargées à 25 kg après 2 jours de conservation initiale (dans l'eau à 20°C) et les trois autres après 28 jours. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3-XX et la figure 3-25.

Les résultats à 1 an montrent que le fluage en flexion diminue lorsque le temps d'attente avant le chargement augmente (ce qui est logique puisque l'éprouvette qui est sollicitée a des résistances mécaniques plus élevées). Cependant cette influence semble être moins grande que dans le cas du fluage en compression.

FIG. 3-25

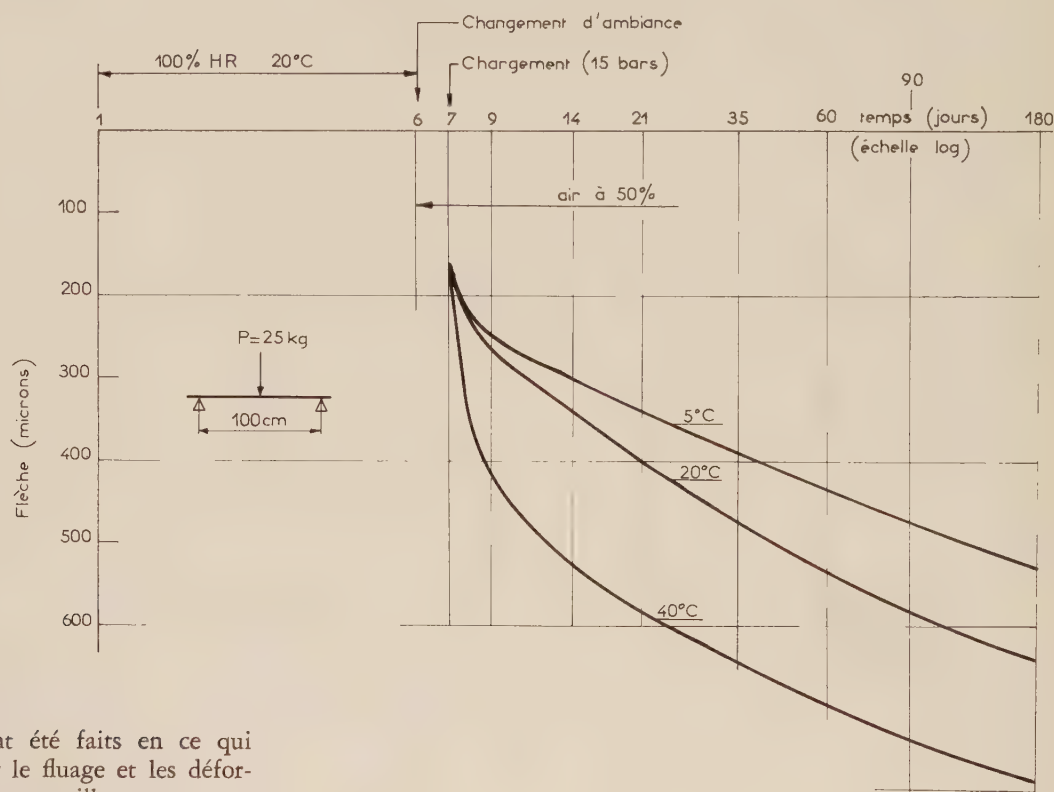
Fluage sur poutre de $5 \times 10 \times 120$ cm - Mortier 1/3 AFNOR.
Influence de l'âge de chargement.

TABLEAU 3-XX

Conservation préalable dans l'eau à 20° C	Résistance au moment du chargement kgf/cm ²		Déformations		
			Au char- gement (flèche en μ)	à 1 an	
	TF	C		Fluage (μ)	Retrait en surface (μ /m)
2 j	48	260	190	1080	800
28 j	90	620	140	730	($\pm$ 20)

FIG. 3-26

Fluage sur poutre de $5 \times 10 \times 120$ cm.
Béton 0/15 mm CPA 400



Influence de la température.

A notre connaissance peu d'essais ont été faits en ce qui concerne l'influence de la température sur le fluage et les déformations en flexion. Ces essais (complétés par ailleurs par ceux relatifs au fluage en compression) ont été effectués sur des bétons 0/15 mm de CPA 400 dosés à 400 kg de ciment par m³ et ayant un rapport E/C de 0,40 (mise en place énergique par vibration sur table). Les éprouvettes de $120 \times 10 \times 5$ cm ont été conservées préalablement pendant 6 jours en atmosphère humide à 20° C puis elles ont été placées dans trois milieux différents à 5, 20 et 40° C (atmosphère d'humidité relative maintenue à 50 %). Après un jour dans leur milieu de conservation définitif elles ont été chargées avec 25 kg de poids, soit une contrainte maximale en traction-flexion de 15 kgf/cm² (un peu moins du tiers de leur résistance en traction-flexion). Les caractéristiques mécaniques des bétons sont les suivantes :

résistances en compression à 7 jours : 570 kgf/cm²,
à 3 mois : 760 (à 5 et 20° C),
680 (à 40° C) ;
résistances en traction-flexion à 7 jours : 60 kgf/cm²,
à 3 mois : 80 (à 5 et 20° C),
74 (à 40° C).

La figure 3-26 donne les résultats obtenus jusqu'à 6 mois de chargement. On voit que le fluage à 20° C varie d'une façon continue dans le temps, il est plus faible à 5° C et plus fort à 40° C. On voit surtout l'influence NON NÉGLIGEABLE de la température. La différence relative de fluage est plus importante en flexion qu'en compression en fonction de la température. Après 6 mois de chargement, le calcul montre que tout se passe comme si l'éprouvette à 5° C était soumise à une contrainte de

12 kgf/cm² (éprouvette témoin, réellement contrainte à 15 kgf/cm²). On a vu par ailleurs que le coefficient de dilatation thermique mesuré sur ces bétons était de l'ordre de 8 à 9 μ /m et par °C, celle à 20° C a une contrainte de 15 kgf/cm² et celle à 40° C a une contrainte de 18 kgf/cm². Le retrait libre à 6 mois et 20° C est de 400 μ /m et les retraites au même âge à 5 et 40° C s'en déduisent (à la dispersion près des résultats), en appliquant ce coefficient de dilatation thermique.

Le calcul montre par ailleurs que seules les variations thermiques ne modifient pas d'une façon appréciable la valeur de la flèche et que ces variations proviennent bien du comportement du matériau lui-même.

3.4. RESULTATS OBTENUS EN TORSION

Remarquons au préalable que le fluage en torsion présente comme avantage d'être assez indépendant du retrait pris par l'éprouvette, contrairement à ce qui se passe dans le cas du fluage en compression ou en traction. Le fluage en torsion n'a été jusqu'à présent que très peu étudié. Nos essais sont souvent assez limités dans le temps puisque nous ne possédons actuellement qu'un seul appareil. Nos essais ont tous été faits sur mortier 1/3 AFNOR (E/C = 0,50).

Les éprouvettes ont d'abord été conservées 28 jours dans l'eau à 20° C puis placées dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C. Les essais de fluage en torsion n'ont pas été poursuivis au-delà de 15 jours.

Influence du taux de chargement.

Un mortier de CPA 400 a été essayé sous des poids de 10, 15 et 20 kg (soit des contraintes de 8,1, 12,2 et 16,3 kgf/cm²). Les résultats obtenus sur la figure 3-27 montrent :

— qu'entre 8,1 et 16,3 kgf/cm² le fluage en torsion est proportionnel à la contrainte appliquée (les droites ne passent pas tout à fait par l'origine ; il est possible que les courbes des déformations en fonction des contraintes s'infléchissent comme l'indique la figure) ;

TABLEAU 3-XXI

Résistances (kgf/cm ²)				Retrait libre 15 j air (μ/m)	Module transversal G (kgf/cm ²)		Résistance en torsion (kgf/cm ²) 28 j eau + 15 j air	Angle de rupture approximatif (degré)
28 j eau		28 j eau + 15 j air			28 j eau	28 j eau + 15 j air		
TF	C	TF	C					
99	710	81	840	540	110 000	150 000	57	40

— QU'AVEC CE CIMENT ET DANS LES CONDITIONS DE NOS ESSAIS, la déformation totale est en première approximation, et par rapport à la déformation initiale :

— doublée à 7 jours,

— triplée à 28 jours.

Les principales caractéristiques de ce mortier de CPA 400 sont données dans le *tableau suivant* (3-XXI).

On constate qu'en portant sur un graphique, en abscisse le logarithme du temps et en ordonnées la différence de fluage en torsion exprimée en 10^{-6} radian, on obtient des droites. On a donc cherché la loi de progression de ε en fonction du temps t . On a pris la formule que l'on trouve souvent proposée dans la littérature :

$$\varepsilon = k (1 - e^{-\alpha t})$$

On obtient alors pour nos résultats :

— pour la contrainte de 8,1 kgf/cm² :

$$\varepsilon = 1600 (1 - e^{-0,025 t})$$

— pour la contrainte de 12,2 kgf/cm² :

$$\varepsilon = 3000 (1 - e^{-0,027 t})$$

— pour la contrainte de 16,3 kgf/cm² :

$$\varepsilon = 3900 (1 - e^{-0,03 t})$$

Si la progression du fluage a une allure analogue dans tous les cas, on constate que l'on a des droites de pentes et d'origines différentes. Les valeurs de k et de α varient ici en fonction du taux de chargement.

Courbe de déchargement.

L'éprouvette sollicitée sous une contrainte de 12,2 kgf/cm² a continué à être mesurée après déchargement à 28 jours. Les résultats de la *figure 3-27* montrent que dès le déchargement, l'éprouvette reprend très rapidement, pratiquement la valeur de la déformation initiale instantanée (comme dans le cas de la relaxation d'éprouvettes sollicitées en compression).

Influence de la nature du ciment.

Dans les mêmes conditions que précédemment, on a confectionné 4 éprouvettes sollicitées sous une contrainte de 12,2 kgf/cm²

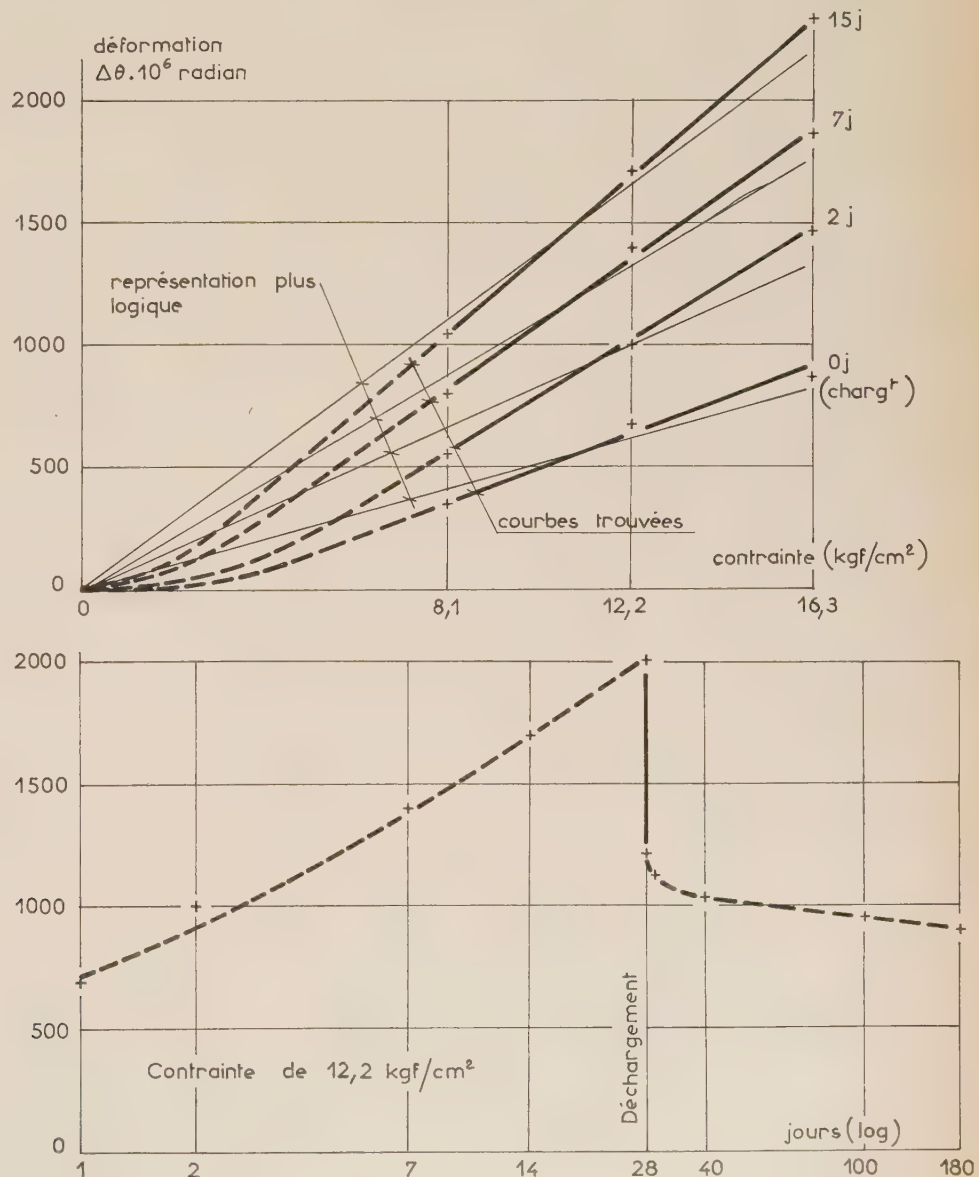


FIG. 3-27

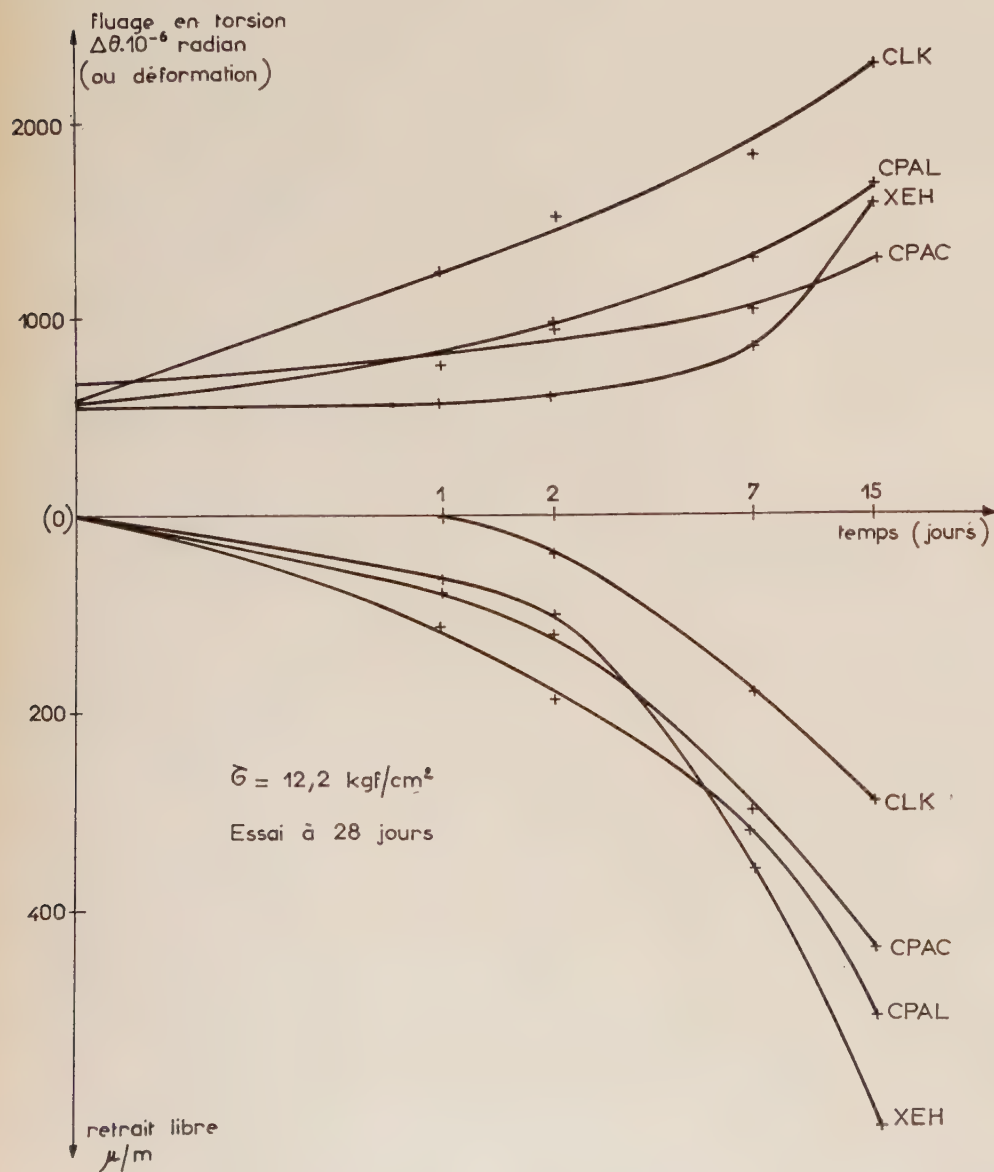
Torsion - Influence du taux de contrainte et courbe de relaxation.

TABLEAU 3-XXII

Essais en torsion

Ciments essayés et résultats obtenus — Eprouvettes de $\varnothing$ 5 cm - L = 30 cm en mortier 1/3 AFNOR
 Conservation initiale : 28 jours dans l'eau à 20° C — Conservation ultérieure : après chargement dans l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C
 Rupture après + 15 jours

Ciments			CPAC (B 374)	CPAL (B 199)	CLK (B 200)	XEH (B 219)
Résistances en kgf/cm ²	28 j eau	TF	76,2	75,8	90	54
		C	440	600	450	240
	28 j eau + 15 j air	TF	74	80,3	56	48,5
		C	578	740	565	310
Retrait libre à 15 j (µ/m)			440	520	290	620
Module transversal G (kgf/cm ²)	28 j eau		112 000	135 000	122 000	144 000
	28 j eau + 15 j air		114 000	153 000	113 000	121 000
Résistance en torsion (kgf/cm ²)			57	57	37	25
Angle de rupture approximatif en degrés			30	35	40	45



et avec 4 liants commerciaux différents (CPAC, CPAL, CLK et XEH). Après 15 jours de fluage en torsion les éprouvettes ont été mesurées, déchargées, puis rechargées jusqu'à rupture, afin d'avoir :

- la variation du module transversal G,
- la résistance à la rupture en torsion.

Les caractéristiques des quatre liants essayés et les résultats obtenus en torsion sont donnés dans le *tableau 3-XXII* et la *figure 3-28*.

FIG. 3-28

Evolution du fluage en torsion.
 Eprouvette cylindrique de $\varnothing$ 5 cm.
 L = 30 cm en mortier 1/3 AFNOR.

TABLEAU 3-XXIII

$\varepsilon = k (1 - e^{-\alpha t})$		
Nature des ciments	Valeurs de	
	k	α
CPAL	2 500	0,047
CPAC	3 100	0,017
CLK	2 400	0,041
XEH	2 600	0,034

On constate qu'avec ces quatre liants :

— les déformations instantanées sont du même ordre de grandeur : entre 560 et 675×10^{-6} radian. Le fluage en torsion le plus élevé à 15 jours a lieu pour le CLK (2 310) puis pour le CPAL (1 920), la chaux hydraulique dont le fluage croît rapidement après 7 jours (1 615) et enfin le CPAC (1 350). Il est possible qu'au-delà de 15 jours les courbes se différencient davantage et se recoupent ;

— il n'y a pas de corrélation entre le fluage en torsion et le retrait hydraulique libre ;

les rapports des résistances $\frac{\text{torsion}}{\text{traction-flexion}}$ varient

entre 0,6 et 0,7. Il semblerait que la résistance en torsion soit du même ordre de grandeur que la résistance pure obtenue par un essai de fendage.

On a également essayé de trouver les 2 paramètres de la formule de fluage en torsion dans le temps. Ces paramètres sont donnés dans le *tableau 3-XXIII*.

3.5. RESULTATS OBTENUS AVEC LES APPAREILS D'EMPREINTE SOUS CHARGE

Nature du ciment.

Une pâte pure de consistance normale a été confectionnée avec différents ciments. Les éprouvettes ont été essayées après 24 heures de durcissement préalable sous une charge de 150 kg appliquée par l'intermédiaire d'une bille de 10 mm de diamètre (*tableau 3-XXIV*).

On constate que les enfoncements instantanés sont d'autant plus importants que les résistances en compression et en traction-flexion sont plus petites. Il existe même une bonne corrélation mise en évidence sur la *figure 3-29*. On retrouve des courbes d'allure analogue à ce que l'on avait en comparant le fluage en compression et les résistances mécaniques. On remarque de plus que l'enfoncement varie peu entre 1 et 7 jours (de 90 à 110 microns suivant la nature des ciments).

Rapport E/C.

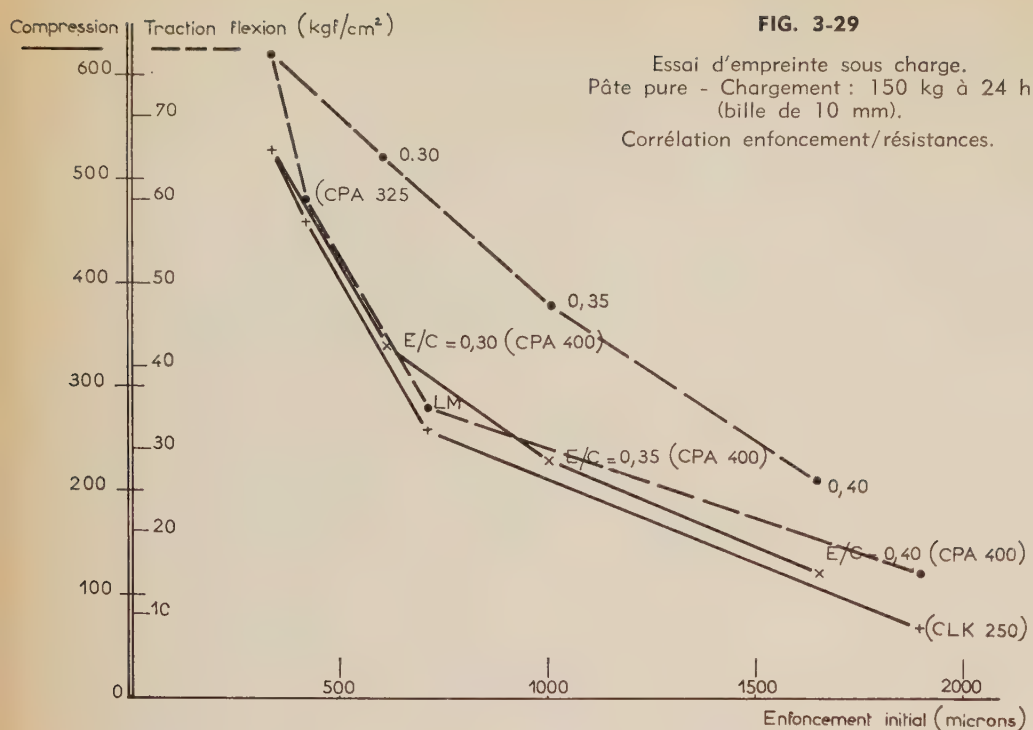
En reprenant le CPA 400, et dans les mêmes conditions

TABLEAU 3-XXIV

Ciments	E/C	Résistances (kgf/cm ²)				Enfoncement (microns)			
		1 j		7 j		Inst.	1 j	3 j	7 j
		TF	C	TF	C				
CPA 400	24,6	78	530	68	900	340	480	540	570
CPAC 325	25,5	60	460	54	650	420	630	680	720
CLK 250	26,8	15	65	26	400	1900	2500	2550	2600
Liant à maçonner	26,5	35	260	42	460	710	940	1000	1050

TABLEAU 3-XXV

Rapports E/C (%)	Résistances (kgf/cm ²)				Enfoncement (microns)			
	1 j		7 j		Inst.	1 j	3 j	7 j
	TF	C	TF	C				
24,6	78	530	68	900	340	480	540	570
30	66	340	28	740	610	820	890	930
35	48	230	21	520	1000	1240	1310	1360
40	27	120	17	390	1650	2020	2080	2120



d'essais, on a fait varier le rapport E/C de 24,6 % (consistance normale) à 40 % (tableau 3-XXV).

plus le temps d'attente est long et plus la résistance à l'enfoncement est élevée (ou plus le fluage est faible).

On retrouve des phénomènes comparables aux précédents :

— forte corrélation enfoncement/résistances (les résultats ont été regroupés sur la figure 3-29 ci-contre),

— faible enfoncement entre 1 et 7 jours.

On constate la très grande importance du rapport E/C de la pâte pure, qui influe à la fois sur les résistances en compression, en traction-flexion et sur les enfoncements initiaux.

Age de chargement.

Toujours avec le même CPA 400, les éprouvettes de pâte pure ont été sollicitées après 24 h (essai habituel au démoulage), puis après des conservations de 2, 7, 28 et 90 jours à l'air à 50 % d'humidité relative et 20° C (tableau 3-XXVI).

Entre 2 et 90 j, les résistances en compression sont proches les unes des autres, cependant, l'enfoncement diminue. Autrement dit — et c'est bien ce que l'on observe pour le fluage — à résistance égale,

TABLEAU 3-XXVI

Age	Résistances (kgf/cm ²)				Enfoncement (microns)			
	Age correspondant		à + 7 j		Inst.	1 j	3 j	7 j
	TF	C	TF	C				
24 h (Dem.)	78	530	68	900	340	480	540	570
2 j	77	820	59	910	320	430	470	530
7 j	55	870	55	880	310	410	440	460
28 j	50	970	50	950	230	290	310	330
90 j	50	860	50	860	200	230	240	250

CHAPITRE 4

CONCLUSIONS

Malgré la complexité du fluage et de tous les paramètres qui viennent s'imbriquer et qui masquent l'interprétation des essais nous sommes arrivé à tirer un certain nombre de conclusions que nous croyons intéressantes. Nous procéderons par étapes pour les résumer.

1) Conclusions relatives aux appareils et aux méthodes

L'arsenal du matériel mis au point a déjà permis d'obtenir une somme importante de résultats et les recherches futures

en seront facilitées. Les appareils de compression et de flexion sont bien mis au point. Ceux relatifs à la traction pure et à la torsion peuvent encore être améliorés. Les appareils d'empreinte permettent de mieux interpréter les phénomènes de fluage obtenus à l'aide des autres appareils. Il est souvent indispensable, pour améliorer la précision des mesures, d'opérer, non plus avec des comparateurs mécaniques au micron mais avec des capteurs de déplacement reliés éventuellement à des enregistreurs pendant un temps limité (pour préciser les courbes de départ). Pour certains types d'éprouvettes et d'essais, on a préconisé l'emploi de cordes vibrantes et donné les précautions opératoires à prendre. Les essais de fluage sont délicats à effectuer : ils doivent être conduits avec un soin tout particulier. Cela nous a obligé à rechercher des méthodes de sélection d'éprouvettes de façon à pouvoir opérer sur un lot qui soit aussi homogène que possible (essais non destructifs par mesure de la vitesse du son au travers d'éprouvettes âgées de 1 ou 2 jours, mesures de poids, aspect...).

2) Conclusions relatives au fluage en compression

Le fluage progresse au moins entre 3 jours et 2 ans comme le logarithme du temps : on constate par exemple qu'il est doublé en passant de 28 jours à 2 ans. Cette progression n'est valable qu'à condition d'appliquer une charge suffisamment éloignée de la charge de rupture. Le fluage progresse plus vite que le logarithme du temps lorsque la charge appliquée dépasse 50 % de la charge de rupture.

Le fluage varie dans le même sens que la valeur de la charge appliquée. Il y a même proportionnalité entre le fluage et la contrainte à condition de considérer l'éprouvette de béton non chargée comme fictivement sollicitée du fait des contraintes de retrait (la valeur de cette sollicitation fictive peut se calculer).

L'influence de la NATURE DU CIMENT a été plus particulièrement étudiée, il semblerait que le fluage le plus faible soit obtenu avec un ciment contenant une forte teneur en silicate tricalcique et peu d'alcalis. Le fluage varie du simple au double suivant la nature du clinker et à finesse de mouture du ciment égale. La finesse joue également un rôle et on a trouvé qu'il y avait pour un clinker donné une finesse optimum — souvent assez élevée — qui donne le fluage minimum. L'influence de la finesse est d'autant plus importante que le béton est chargé à un âge plus jeune. Pour un béton 0/15 mm de granulats de Seine, dosé à 350 kg de ciment et sollicité sous 150 kgf/cm² à 28 jours, la déformation totale à 1 an sur éprouvettes de 7 × 7 × 28 cm conservées à 50 % d'humidité relative est comprise entre 1 000 et 2 000 μ/m, la déformation instantanée est comprise entre 400 et 600 μ/m et le retrait libre entre 300 et 400 μ/m.

Le fluage sur pâte pure est élevé ; on a trouvé qu'il pouvait être 2 à 3 fois plus important que sur le béton : il existe un dosage en ciment — qui est d'ailleurs assez élevé, comme dans le cas de la finesse — et qui donne le fluage minimum. Ce dosage serait à préciser dans des études ultérieures.

Les constituants secondaires ajoutés modifient le fluage dans la mesure où ils modifient les résistances mécaniques. L'addition de chaux grasse qui diminue les résistances augmente le fluage et le retrait. L'addition d'alcalis — qui augmente le retrait hydraulique et qui diminue les résistances à long terme — augmente le fluage à long terme.

On a bien mis en évidence l'existence d'une corrélation souvent assez forte entre les résistances mécaniques au moment de l'application des charges et les déformations initiales et le fluage des bétons (dans un certain domaine de résistance). Cette relation est de la forme $\varepsilon(t) = \frac{K}{R^n}$

(ε étant le fluage, R les résistances, K et n des paramètres). On a aussi cherché des corrélations entre le retrait hydraulique après prise et le fluage. Cette corrélation existe souvent mais pas d'une façon systématique : c'est le cas lorsque l'on diminue les résistances mécaniques sans modifier le retrait hydraulique (par exemple en ajoutant un pourcentage élevé d'air occlus) ou en augmentant le retrait sans modifier les résistances mécaniques à long terme (ajout de chlorures...).

La carbonatation qui a comme conséquence une augmentation des résistances mécaniques diminue, par voie de conséquence, le fluage alors que le retrait hydraulique après prise est augmenté par carbonatation.

On a observé également :

— qu'à résistance mécanique égale les déformations instantanées et le fluage étaient d'autant plus élevées que l'éprouvette de béton était chargée à un âge plus jeune ;

— qu'à partir d'une certaine résistance mécanique (d'ailleurs assez élevée) une augmentation des résistances mécaniques fait diminuer relativement peu le fluage ;

— que les rapports $\frac{\text{résistances mécaniques}}{\text{déformation}}$ diminuent lorsque les résistances mécaniques elles-mêmes diminuent.

Le fluage proprement dit dans l'air à 50 % d'humidité relative est 2 à 3 fois plus élevé que dans l'eau.

Lors du déchargement d'une éprouvette, la déformation instantanée de retour est plus faible que la déformation instantanée au chargement, et cela d'autant plus que la contrainte appliquée a été plus élevée. La courbe de retour (recouvrance) se stabilise assez vite du fait de la superposition de 2 phénomènes variant en sens inverse :

— le retour lent après déchargement,

— le retrait hydraulique après prise qui se poursuit.

De cet ensemble de résultats, le praticien pourra conclure que pour avoir un fluage minimum, et indépendamment des conditions de conservation, il faut :

— choisir un ciment à fortes résistances initiales (et partant fortement dosé en C₃S et assez fin) surtout si le chargement doit être effectué à un jeune âge,

— utiliser un dosage en ciment assez élevé,

— charger le plus tardivement possible,

— éviter l'évaporation de l'eau du béton.

C'est dire que les formules de prévision du fluage devraient comporter la valeur de la résistance du matériau au moment de la mise en charge. Cela simplifierait les formules où entrent certains paramètres tels que les rapports E/C, le dosage en ciment... paramètres qui conditionnent les résistances mécaniques.

3) Conclusions relatives aux autres sollicitations

LE FLUAGE EN TRACTION est pour des charges pas trop élevées proportionnel au logarithme du temps, à la valeur de la charge appliquée, et d'autant plus faible que les résistances mécaniques du matériau sont plus élevées. Pour une contrainte de 30 kgf/cm², le fluage à 1 an est de l'ordre de 250 μ/m alors qu'il serait, dans les mêmes conditions, de l'ordre de 400 μ/m en compression pour une contrainte de 50 kgf/cm². On peut donc en conclure, au moins en première approximation, que le fluage spécifique proprement dit est du même ordre de grandeur en compression qu'en traction. Cela est une conclusion à la fois pratique et théorique importante.

LE FLUAGE EN FLEXION, facile à obtenir avec nos appareils est, comme dans le cas de la compression ou de la traction, proportionnel aux charges appliquées et au logarithme du temps.

La flèche est d'autant plus grande que la résistance du matériau est plus faible et qu'il est chargé à un plus jeune âge. On a montré par ailleurs la grande influence exercée par la température dont l'élévation augmente le fluage (de 20 % environ en passant de 20 à 40° C pour des éprouvettes de béton durcies préalablement 28 jours dans l'eau à 20° C).

Dans les essais limités effectués EN TORSION, on retrouve les mêmes lois générales :

— augmentation du fluage en fonction du logarithme du temps ou en fonction de $k(1 - e^{-\alpha t})$, k et α étant des paramètres variables suivant la nature du matériau et les conditions de conservation,

— proportionnalité du fluage en torsion et des contraintes appliquées lorsque celles-ci ne sont pas trop élevées,

— proportionnalité entre le fluage en torsion et les résistances mécaniques.

Les appareils d'EMPREINTE opérant sur pâte pure donnent des indications sur le comportement de ce matériau. Les déformations sont instantanées lors de la mise en charge et elles progressent ensuite lentement. Les déformations totales sont d'autant plus élevées que le matériau a une plus faible résistance mécanique, c'est-à-dire que les déformations sont d'autant plus fortes :

— que le ciment essayé a de plus faibles résistances,

— que le rapport E/C est plus élevé (les déformations sont multipliées par 3 en passant d'un $E/C = 0,25$ à un $E/C = 0,40$),

— que le matériau est sollicité à un plus jeune âge.

L'ensemble de ces résultats forme donc un tout cohérent. Bien qu'il n'ait pas été possible de trouver une formule générale simple tenant compte des paramètres principaux, le sens des variations observées et les ordres de grandeur donnés devraient être utiles aux praticiens. Dans l'état actuel des recherches il vaut mieux se servir de graphiques plutôt que de formules empiriques pour évaluer le fluage.

Les appareils élaborés et les problèmes soulevés par certains points de ces recherches permettront d'une part la poursuite de nos propres recherches et d'autre part celles d'autres expérimentateurs en vue d'une meilleure connaissance de tous ces problèmes complexes.

Il resterait également à préciser comment évolue :

— le fluage en fonction du rapport : $\frac{\text{contrainte appliquée}}{\text{résistance du matériau}}$

— le fluage d'un béton sollicité non seulement par des contraintes mono-axiales mais également par des contraintes bi- et tri-axiales,

— le coefficient de POISSON.

CHAPITRE 5

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. WOOLSON (Ira. H.) :
Some remarkable tests indicating flow of concrete under pressure.
Engineering News, V. 54 n° 18, Nov. 2, 1905.
2. FREYSSINET (E.) :
Les phénomènes de retrait et de déformation lente des bétons et mortiers.
C.R.C.E. Sup. de l'Institut du B.T. et des T.P., Juillet 1934.
3. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE :
Shrinkage and creep in concrete.
Bibliography 1905-1966, Committee 209, Détroit, Michigan, U.S.A. 1967.
4. ARUTUNJAN (E.) :
Fluage des matériaux vieillissants - Fluage du béton.
Inznerij Zurnal Mehanika Tverdogo Tela, n° 6, 1967. Trad. 68/15 (G 1208 au C.E.R.I.L.H.).
5. L'HERMITE (R.) :
Que savons-nous de la déformation plastique et du fluage du béton ?
Annales de l'I.T.B.T.P., sept. 1957 et fév. 1959.
6. Publication de la Cement and Concrete Association (G.B.)
Bibliography :
Annotated bibliography on the creep and shrinkage of concrete.
U.D.C., 620.192.5 : 666.94 ch. 47/1/65.
7. NEVILLE (A.M.) :
Role of cement in the creep of mortar.
JACI, mars 1959.
— Creep recovery of mortars made with different cements.
JACI, août 1959.
— Creep of concrete as a function of its cement paste content.
Mag. of Conc. Res., vol. 16, n° 46, mars 1964.
8. BEST (C.H.) :
Creep of lightweight concrete.
Mag. of Concr. Research, nov. 1959, vol. 11, n° 33.
9. HOPE (B.B.), NEVILLE (A.M.) et GURUSWAMI (A.) :
Influence of admixtures on creep of concrete containing normal weight aggregate.
Symposium RILEM-ABEM, Tome IV, p. 19, Bruxelles, sept. 1967.
10. THIEL (K.) :
Influence de la dimension de l'éprouvette sur le retrait, le fluage et le module d'élasticité du béton.
Annales de l'I.T.B.T.P., oct. 1960.
11. MAMILLAN (M.) :
Evolution du fluage et des propriétés du béton.
Annales de l'I.T.B.T.P., oct. 1960.
Fluage du béton.
Annales de l'I.T.B.T.P., juin 1966.
12. LE CAMUS (B.) :
Recherches expérimentales sur la déformation du béton et du béton armé.
C.R. des recherches 1945-46, Laboratoire du Bâtiment et des T.P.
13. PIHLAJAVAARA (S.E.) :
Some results of the effect of carbonation on the porosity and pore size distribution of cement paste.
R.I.L.E.M. - Matériaux et Construction, nov.-déc. 1968.
14. SOLOMATOV :
La diminution du fluage et du retrait des éléments en béton à l'aide de revêtements polymères.
Beton i zhelezobeton, U.R.S.S., n° 3, mars 1964. (Traduction 1380 du C.R.I.C., Bruxelles).
15. ENGLAND (G.L.) et ROSS (A.D.) :
Reinforced concrete under thermal gradients.
Mag. of Concrete Res., n° 40, mars 1962.
16. KURASAWA (S.) :
Creep behavior at elevated temperature.
Collected Papers, vol. 5, 1967, University of Tokio.

17. VENUAT (M.) :
Influence de la température sur le fluage du béton.
Communication aux Journées de l'A.S.P., mars 1969.
18. CRUZ (C.R.) :
Apparatus for measuring creep of concrete at high temperature.
Journal of the P.C.A. Research and Dt. Lab., sept. 1968.
19. MARECHAL (J.C.) :
Le fluage du béton en fonction de la température.
Colloque de Munich sur le fluage, avril 1968.
20. GUYON (Y.) :
Constructions en béton précontraint.
Tome 1, p. 27 à 52, Eyrolles 1966.
21. DELARUE (J.) :
Fluage et béton précontraint.
Annales de l'I.T.B.T.P., mai 1960.
22. MITZEL (A.) :
Sur l'hypothèse de l'égalité des déformations de fluage en compression et en traction ainsi que sur le principe de superposition du fluage et du retrait.
Annales de l'I.T.B.T.P. n° 241, janv. 1968.
23. DAVIS (R.E), TROXELL et RAPHAEL :
Long time creep and shrinkage tests of plain and reinforced concrete.
A.S.T.M., Proc., 1958.
24. LAMBOTTE (H.) :
Le fluage du béton en torsion.
Bulletin de la R.I.L.E.M. n° 17, déc. 1962.
25. ROSS (A.D.) :
Experiments on the creep of concrete under two dimensional stressing.
Mag. of concr. Res., vol. 6, n° 16, juin 1954.
26. POWERS (T.C.) :
Interprétation des essais de fluage sur le béton.
Bulletin de la R.I.L.E.M. n° 34, mars 1967.
The thermodynamics of volume change and creep.
R.I.L.E.M. - Matériaux et Construction, nov.-déc. 1968.
27. RUETZ (W.) :
A hypothesis for the creep of hardened cement paste and the influence of simultaneous shrinkage.
Int. Conf. on the structure concrete paper, 63, Londres 1965.
28. NEVILLE (A.M.) :
Theories in creep in concrete.
JACI, sept. 1955, n° 1.
29. DANTU (P.) :
Utilisation des réseaux pour l'étude des déformations.
Annales de l'I.T.B.T.P., janv. 1958.
30. HANSEN (T.C.) :
Cracking and fracture of concrete and cement paste.
Paper n° 3, Publication SP-20, 1966, A.C.I. Détroit, Michigan.
31. PERSOZ (B.) :
Introduction à l'étude de la rhéologie.
Dunod, 1960.
32. NOWACKI (W.) :
Théorie du fluage.
Eyrolles, 1965.
33. REINER (M.) :
Rhéologie théorique.
Dunod, 1955.
34. HANSEN (T.C.) :
Creep and stress relaxation of concrete.
Handlingar NR 31 Swedish Cement and Concrete Inst. - Inst. of Technology, Stockholm 1960.
35. YOKOMICHI et KAKUTA :
On instantaneous deformation of concrete (74).
Review of the 21 General Meeting, 1967, Tokio.
36. GIANGRECO (E.) :
Premiers résultats d'une recherche expérimentale sur le fluage et le retrait des ciments.
Bulletin de la R.I.L.E.M. n° 13, déc. 1961.
37. HANNANT (D.J.) :
Creep and creep recovery of concrete subjected to multiaxial compressive stress.
Journal of A.C.I. (U.S.A.), mai 1969.

AUTRES REFERENCES

- Nouveaux résultats de recherches sur la déformation et la rupture du béton, par :
R. L'HERMITE, M. MAMILLAN, C. LEFEVRE.
Annales de l'I.T.B.T.P., mars-avril 1965.
- Colloque R.I.L.E.M. : Causes physiques et chimiques du fluage et du retrait du béton, 1-3 avril 1968.
- Articles publiés dans la revue de la R.I.L.E.M. "Matériaux et Construction", Nov.-déc. 1968 n° 6, janv.-fév. 1969 n° 7, mars-avril 1969 n° 8.

RÉSUMÉ

Le travail présenté comporte trois parties principales. Dans une première partie l'auteur fait le point et résume les résultats déjà publiés depuis 1905 et relatifs aux principaux paramètres qui influent sur le fluage du béton. Il passe ensuite en revue les différentes théories, les modèles rhéologiques proposés ainsi que les formules empiriques ou les graphiques permettant d'évaluer, dans certaines conditions, le fluage du béton. Dans une deuxième partie sont décrits les appareils souvent originaux qui ont été construits spécialement en vue de cette étude. Il s'agit de la mise au point d'appareils ou en torsion, ainsi que d'appareils d'empreinte. L'auteur donne également les précautions opératoires à prendre en vue d'une plus faible dispersion des mesures. Les résultats obtenus à l'aide des appareils variés mentionnés dans cette deuxième partie sont présentés dans une troisième partie. On a plus particulièrement étudié l'influence du ciment (nature, finesse, dosage), des additions (constituants secondaires, chaux grasse) et de certains adjuvants.

L'auteur a pu donner les grandes lois du fluage en ce qui concerne son évolution dans le temps en fonction des charges appliquées et en fonction des résistances du matériau. Il a montré quelles pouvaient être les relations du fluage avec le retrait hydraulique après prise ou les résistances mécaniques et les relations existant entre le fluage obtenu par diverses natures de sollicitations.

Des conclusions à la fois de caractère scientifique et pratique sont données afin de permettre d'une part la poursuite des recherches dans certains domaines non encore explorés et d'autre part une meilleure prévision du fluage dans le temps.

SUMMARY

This work is in three parts. The first part is a restatement and summarises the recordings published since 1905 dealing with the main parameters which effect creep of concrete. The Author then makes a recap of different theories, the rheological types proposed, with empirical formulae or graphics which enable computing, in certain conditions, the creep of concrete. The second part deals with apparatus, often of an original type, purpose-fabricated in view of this investigation. This concerns the development of apparatus for measuring creep in compression, bending, under tensile or torsion conditions, together with "squeeze" apparatus. Likewise, the Author gives operational precautions to be taken for the purpose of ensuring higher precision of the measurements. The recordings effected with the various apparatus mentioned in the second part are the subject of a third part. The study covers notably the influence of cement (type, fineness, proportioning), additions (secondary components, rich lime) and certain additives.

The Author was able to give the main laws governing creep concerning its evolution with time in relation to the applied loading and the strength of the materials. He has shown the possible relationship of post-creep or mechanical strength with that existing between the creep obtained by diverse types of stressing.

Conclusions, both scientific and practical, are supplied in order to enable pursuing research in certain fields not yet explored plus a more satisfactory forecast for creep over a period of time.

Conclusions, both scientific and practical, are supplied in order to enable pursuing research in certain fields not yet explored plus a more satisfactory forecast for creep over a period of time.

Vu et Permis d'imprimer :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

ROBERT MALLET

Vu et approuvé :

Paris, le 19 Mai 1970

Le Doyen de la Faculté des Sciences de Paris,

MARC ZAMANSKY

